

國立交通大學

土木工程研究所

碩士論文

應用專家系統於地下水模式  
自動化參數檢定之研究

**Automatic Parameters Identification of  
Groundwater Model using Expert System**

研究生：陳韋圻

指導教授：張良正 博士

中華民國九十七年十二月

應用專家系統於地下水模式  
自動化參數檢定之研究

**Automatic Parameters Identification of  
Groundwater Model using Expert System**

研究生：陳韋圻  
指導教授：張良正

Student : Wei C. Chen  
Advisor : Liang C. Chang

The logo of National Chiao Tung University is a circular emblem with a gear-like border. Inside the circle, there is a stylized figure of a person holding a torch, with a book and a gear also visible. The text '國立交通大學' is at the top, '土木工程學系碩士班' is in the middle, and '碩士論文' is at the bottom.

國立交通大學  
土木工程學系碩士班  
碩士論文

**A Thesis**

**Submitted to Department of Civil Engineering  
National Chiao Tung University  
in Partial Fulfillment of Requirements  
for the Degree of  
Master of Science  
in  
Civil Engineering  
September 2008  
Hsinchu, Taiwan, Republic of China**

中華民國九十七年十二月

# 應用專家系統於地下水模式自動化參數檢定之研究

學生：陳韋圻

指導教授：張良正 博士

國立交通大學土木工程研究所

## 摘要

傳統上地下水模式之參數檢定可分為人工參數檢定及應用優選法之自動化參數檢定。人工參數檢定在推估參數時，過程不但複雜、冗長、且需要花費許多時間，進行參數檢定的人員除了需具備相關地下水知識外，亦須具有參數檢定之經驗與技巧。自動化參數檢定則通常是將地下水模式結合優選法進行參數檢定，雖然可免去人工參數檢定的繁瑣過程，但優選法之參數搜尋過程對使用者而言是難以參與的黑盒，往往只能被動的檢視最後的檢定結果，另外因為地下水模式甚至優選模式本身，往往皆對問題有相當程度的簡化，自動參數檢定所得之結果亦可能產生不符現地條件的情況。

有鑑於此，本研究整合規則式專家系統與地下水模式 MODFLOW 發展智慧型地下水參數檢定系統，並透過四個檢定案例驗證系統的正確性，其中分別為水力傳導係數(Hydraulic Conductivity, K)檢定案例、比出水量(Specific Yield,  $S_y$ )檢定案例及兩個同時檢定水力傳導係數與比出水量之案例。本研究發展之參數檢定系統可在保有自動化參數檢定的快速及方便的同時，亦可有人工參數檢定之彈性及可解釋性，並能進一步累積整合參數檢定之經驗，及具有只需增加相關規則即能擴充系統功能的彈性。

# **Automatic Parameters Identification of Groundwater Model using Expert System**

Student : Wei-Chi Chen      Advisor : Dr. Liang-Cheng Chang

Department of Civil Engineering  
National Chiao Tung University

## **Abstract**

Conventionally, parameters identification of groundwater model can be classified into manual parameters identification and automatic parameters identification using optimization method. Parameter searching in manual parameters identification requires heavily interaction with the modeler. Therefore, the identified parameters value is interpretable by the modeler. However, manual method is a complicated and time-consuming work and requires groundwater modeling practice and parameters identification experiences to performing the task. Optimization-based identification is more efficient and convenient comparing to the manual one. Nevertheless, the parameters search in the optimization approach can not directly interactive with modeler and one can only examine the final results. Moreover, because of the simplification of the optimization model, the parameters value obtained by optimization-based identification may not be feasible in reality.

In light of previous discussion, this study integrates a rule-based expert system and a groundwater simulation model, MODFLOW 96, to develop an automatic groundwater parameters identification system. The hydraulic conductivity and specific yield are the parameters to be calibrated in the system. Since the parameter value is automatic searched according the rules that are specified by modeler, it is efficient and the identified parameters value is more interpretable than that by optimized based approach. Beside, since the rules are easy to modify and adding, the system is flexible and can accumulate the expertise experiences. Several hypothesized cases were used to examine the system validity and capability. The result shows a good agreement between the identified and given parameter values and also demonstrates a great potential for extending the system to a fully function and practical field application system.

## 謝誌

感謝吾師張良正教授對於本論文之指導及研究生涯中對學生工作態度及學問研究之啟發，使學生受益匪淺。承蒙口試委員 劉振宇教授、童慶斌教授、李天浩副教授及蕭金財副教授在口試前細心審閱學生的論文，並於口試期間給予保貴之意見，使得本文更趨於完備，在此謹致衷心謝意。

特別感謝蔡瑞彬學長全程參與及指導本論文的撰寫，也感謝陳宇文學長的鼎力相助，感謝張老師研究室所有成員的陪伴及互相幫助。最後感謝家人在精神上及經濟上的支持，讓我得以順利取得碩士學位。



# 目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
謝誌.....	III
目錄.....	IV
表目錄.....	VI
圖目錄.....	VII
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 文獻回顧.....	2
第二章 研究步驟.....	5
第三章 研究方法.....	7
3.1 智慧型地下水參數檢定系統架構.....	7
3.2 專家系統介紹.....	8
3.3 CLIPS 介紹.....	9
第四章 智慧型地下水參數檢定系統發展.....	11
4.1 參數檢定流程.....	11
4.2 地下水模式自動化參數檢定系統建置.....	13
4.2.1 地下水模擬次系統建置.....	13
4.2.2 參數檢定次系統建置.....	14
4.3 參數檢定規則說明.....	15
4.3.1 參數值合理性檢測規則.....	15
4.3.2 各分區容許誤差值選定規則.....	16
4.3.3 水力傳導係數(Hydraulic Conductivity) 調整規則.....	16

4.3.4 比出水量(Specific Yield) 調整規則 .....	17
4.3.5 各分區參數調整合理性檢測規則 .....	18
4.3.6 參數大幅調整規則.....	19
第五章參數檢定系統應用測試 .....	20
5.1 水力傳導係數(Hydraulic Conductivity)檢定測試.....	22
5.2 比出水量(Specific Yield)檢定測試 .....	30
5.3 水力傳導係數(Hydraulic Conductivity)與比出水量(Specific Yield)檢定測試.....	37
第六章 結論與建議 .....	61
6.1 結論.....	61
6.2 建議.....	62
參考文獻.....	63
附錄 A MODFLOW 簡介 .....	附 65
附錄 B 參數檢定完整規則展示 .....	附 70



## 表目錄

表 5-1 案例列表.....	5-21
表 5.1-1 參數設定表(案例 I).....	5-23
表 5.1-2 參數結果表(案例 I).....	5-25
表 5.2-1 參數設定表(案例 II).....	5-30
表 5.2-2 參數結果表(案例 II).....	5-32
表 5.3-1 參數設定表(案例 III).....	5-37
表 5.3-2 參數 K 結果表(案例 III).....	5-39
表 5.3-3 參數 Sy 結果表(案例 III).....	5-40
表 5.3-4 參數設定表(案例 IV).....	5-49
表 5.3-5 參數 K 結果表(案例 IV).....	5-53
表 5.3-6 參數 Sy 結果表(案例 IV).....	5-54

## 圖目錄

圖 2-1 研究步驟流程圖 .....	2-6
圖 3.1-1 智慧型地下水參數檢定系統架構圖 .....	3-8
圖 4.1-1 參數檢定流程圖 .....	4-13
圖 5.1-1 分區與邊界配置圖(案例 I).....	5-23
圖 5.1-3 各區水位均方根誤差圖(案例 I).....	5-26
圖 5.1-4 全區水位均方根誤差圖(案例 I).....	5-26
圖 5.1-5 2 號分區水位-時刻圖(案例 I).....	5-27
圖 5.1-6 3 號分區水位-時刻圖(案例 I).....	5-27
圖 5.1-7 2 號分區 K 值調整過程圖(案例 I).....	5-28
圖 5.1-8 3 號分區 K 值調整過程圖(案例 I).....	5-28
圖 5.1-9 2 號分區平均模擬水位變化圖(案例 I).....	5-29
圖 5.1-10 3 號分區平均模擬水位變化圖(案例 I).....	5-29
圖 5.2-1 各區水位均方根誤差圖(案例 II).....	5-32
圖 5.2-2 全區水位均方根誤差圖(案例 II).....	5-33
圖 5.2-3 6 號分區水位-時刻圖(案例 II) .....	5-33
圖 5.2-4 8 號分區水位-時刻圖(案例 II) .....	5-34
圖 5.2-5 4 號分區 $S_y$ 值調整過程圖(案例 II) .....	5-34
圖 5.2-6 8 號分區 $S_y$ 值調整過程圖(案例 II) .....	5-35

圖 5.2-7	6 號分區模擬水位標準差變化圖(案例 II)	5-35
圖 5.2-8	8 號分區模擬水位標準差變化圖(案例 II)	5-36
圖 5.3-1	各區水位均方根誤差圖(案例 III)	5-40
圖 5.3-2	全區水位均方根誤差圖(案例 III)	5-41
圖 5.3-3	8 號區水位-時刻圖(案例 III)	5-41
圖 5.3-4	9 號分區水位-時刻圖(案例 III)	5-42
圖 5.3-5	8 號分區 K 值調整過程圖(案例 III)	5-42
圖 5.3-7	8 號分區平均模擬水位圖(案例 III)	5-43
圖 5.3-8	9 號分區平均模擬水位圖(案例 III)	5-44
圖 5.3-9	8 號分區 Sy 值調整過程圖(案例 III)	5-44
圖 5.3-10	9 號分區 Sy 值調整過程圖(案例 III)	5-45
圖 5.3-11	8 號分區模擬水位標準差圖(案例 III)	5-45
圖 5.3-12	9 號分區模擬水位標準差圖(案例 III)	5-46
圖 5.3-13	分區與邊界配置圖(案例 IV)	5-48
圖 5.3-14	抽水量-時刻圖(案例 IV)	5-50
圖 5.3-15	各區水位均方根誤差圖(案例 IV)	5-55
圖 5.3-16	全區水位均方根誤差圖(案例 IV)	5-55
圖 5.3-17	4 號分區水位-時刻圖(案例 IV)	5-56
圖 5.3-18	5 號分區水位-時刻圖(案例 IV)	5-56

圖 5.3-19	4 號分區 K 值調整過程圖(案例 IV).....	5-57
圖 5.3-20	4 號分區平均模擬水位變化圖(案例 IV).....	5-57
圖 5.3-21	4 號分區水位均方根誤差圖(案例 IV).....	5-58
圖 5.3-22	4 號分區 Sy 值調整過程圖(案例 IV).....	5-58
圖 5.3-23	5 號分區 Sy 值調整過程圖(案例 IV).....	5-59
圖 5.3-24	4 號分區模擬水位標準差變化圖(案例 IV).....	5-59
圖 5.3-25	5 號分區模擬水位標準差變化圖(案例 IV).....	5-60



# 第一章 緒論

## 1.1 前言

台灣雨量雖然豐沛，約為世界平均值之 2.6 倍，但因地狹人稠，每人每年所分配雨量僅及世界平均值之七分之一，且雨量在時間及空間上之分佈極不均勻，五月至十月之雨量即佔全年之 78%，枯水期長達六個月，再加上河川坡陡流急、腹地狹隘，逕流量被攔蓄利用的僅有 177.54 億立方公尺，約佔年總逕流量之 18%，其餘均奔流入海。因此若欲增加河川流量之利用率，增建水工結構物攔蓄河川流量為一最直接之方法，惟近年來由於環境保護意識高漲，加上原本地表水工結構物密度趨於飽和，使得此方法並無法落實。幸而台灣除了地表水資源外，尚蘊含豐富之地下水資源，倘若能善用地下水資源將可減緩台灣枯水期水資源之負擔，因此如何有效的運用與管理地下水是一門重要的課題。

為了有效的運用與管理地下水資源，建立地下水模式分析地下水資源相關資訊是常用的方法之一，而在建立模式過程中，參數檢定乃是必要的步驟，而一般的參數檢定方法可分為人工參數檢定與自動參數檢定。人工參數檢定在推估參數時，過程不但複雜、冗長、且需要花費許多時間，進行檢定的人員除了需具備相關地下水知識外，亦須具有參數檢定之經驗與技巧。此外，如何將一位專家的參數檢定知識轉移給其他需進行人工參數檢定之人員也是相當不易。人工參數檢定雖有上述缺點，惟其在進行參數推估時，參數的修正常存在至少是定性上的邏輯或經驗的判斷，檢定的過程中人與模式的不斷互動，因此人工參數檢定雖然繁瑣且費時費工，但檢定本身除了可對問題有更深入的了解外，檢定者若是一個有經驗的專家，其結果往往較不易發生背離現地物理特性的情形。

自動化參數檢定則通常是將地下水模式結合優選法進行參數檢定，雖然可免去人工參數檢定的煩瑣，但使用者難以參與參數變動過程，往往只能被動的接受最後的檢定結果，而因為地下水模式甚至優選模式本身，往往皆對問題有相當程度的簡化，自動參數檢定所得之結果亦可能產生不符物理條件的狀況。

因此，本研究乃試圖發展新的參數檢定方法，期能在保有自動化參數優選檢定的快速及方便的同時，亦能保有人工參數檢定之彈性及可解釋性，並能累積整合專家之經驗，使得參數檢定的工作更為正確與方便。

## 1.2 研究目的

為解決人工參數檢定的繁瑣及優選法的缺乏彈性及難以解釋，本研究結合專家系統與地下水模擬模式發展「智慧型地下水參數檢定系統」，使參數檢定的工作更易於了解與方便。

## 1.3 文獻回顧

在分析地下水相關問題時，往往都會先建立一個地下水模擬模式，再以此模式為基礎作進一步分析。在使用地下水模式之前，必須先給定模式中之參數，但許多參數無法直接由現地量測而得到，而必須由歷史觀測資料來推估(Yeh, 1985)，這時則必須依據觀測資料再經由參數檢定的過程才能推估得參數值。

人工參數檢定亦常用於檢定模式參數，惟其缺點為推估參數的過程複雜而冗長，且需要花費許多時間。另外如何將專家的參數檢定知識轉移給他人也是困難的過程(Madsen et al., 2001; Chau and Chen, 2001; Chau, 2004; Chau, 2006)。為了解決人工檢定費時費工的問題，許多研究利用優選法進行模式之自動參數檢定(Mazi, et al., 2004; Mazi, et al., 2000; Hill, et al., 1992.)，在電腦普及計算速度突飛猛進的

現在，自動參數檢定則妥善利用此優點，達到相較於人工率定省時省力的目的。然而，應用優選法於參數檢定之參數搜尋過程對使用者而言是難以參與的黑盒，往往只能被動的檢視最後的檢定結果，其所推估之參數值亦未必皆能達到專家所認同之合理範疇內。

Boyle (2000)比較了水文模式之人工參數檢定及應用優選法之參數檢定，並且合併兩種參數檢定方法以改善兩者之缺點。他比較人工參數檢定與應用優選法之參數檢定所得到之結果，指出前者較能被水文學家所接受，因為人工參數檢定之過程不僅可以被檢視，而且能幫助水文學家進行結果分析。

有鑑於將專家之人工參數檢定的專業知識轉移給他人很困難，許多研究皆應用專家系統協助進行參數檢定(Abbott, 1991; Chau and Chen, 2001; Chau and Albermani, 2002, 2003; Chau, 2004; Kim, 2007)。專家系統是一個仿有決策能力的人類專家之智慧型電腦系統，並且使用知識與推理的過程來解決需要專業知識才能解決的問題。使用者可以透過與專家系統的互動介面來描述問題，如此專家系統便能回答出一個有根據的答案。

應用專家系統協助使用者檢定參數已有一段時間，因為此系統可以將檢定人員的個人因素減到最低，以保持參數檢定的一致性，讓初學者也可以得到與專家的同樣結果(Chau, 2006)。Kim 等人於 2007 年使用專家系統(Expert system for calibration of HSPF, HSPEXP)協助檢定水文模式(Hydrologic Simulation Program Fortran, HSPF)；Madsen 等人於 2002 年應用專家系統幫助檢定降雨逕流模式；Chau 於 2003 年至 2004 年使用專家系統協助檢定海岸及其相關模式。

上述專家系統協助參數檢定皆需要使用者與系統互動，且大多數的專家系統只建議需修改的參數及其可能範圍，系統本身並未直接

更新參數值，仍然需要使用者輸入改變；本研究將更進一步，應用專家系統發展一個除了產生修改參數的建議外，亦能根據規則自動搜尋適當參數值之智慧型自動參數檢定系統，此系統可以透過專家系統內部的知識庫表達及累積參數檢定專家之經驗。期望透過此自動參數檢定系統，即使為地下水模式參數檢定之初學者，其檢定結果亦可與專家檢定所得結果接近。



## 第二章 研究步驟

本研究之研究步驟如圖 2-1 所示，第一階段為資料蒐集，在建置系統之前，必須先搜集地下水模擬與參數檢定之經驗及知識，除了從文獻中得到相關資訊外，熟悉地下水模擬及參數檢定之專家也是重要的知識蒐集來源之一。

第二階段為系統建置，此階段可分為地下水模式建置及地下水參數檢定專家系統建置兩部分。在地下水模式建置部份，本研究採用 USGS(U.S. Geological Survey) 所開發之地下水模式 MODFLOW，此模式亦是目前最被廣為使用之地下水模式之一，其乃一使用有限差分法之三維地下水模式，可模擬受壓及非受壓水層之穩態與非穩態流場，本研究所採用之版本為 MODFLOW-96，有關 MODFLOW 其他介紹詳見附錄 A。在地下水參數檢定專家系統建置部份，本研究採用美國太空總署強森太空中心(NASA's Johnson Space Center)所開發之 CLIPS(C Language Integrated Production System)建立地下水模式參數檢定專家系統。CLIPS 係一專家系統之開發工具，提供了完整的環境讓使用者建立以規則推論為主之專家系統。

第三階段為系統測試，此階段應用地下水參數檢定專家系統進行參數檢定，首先為系統案例檢定測試，其次為參數檢定測試結果分析。

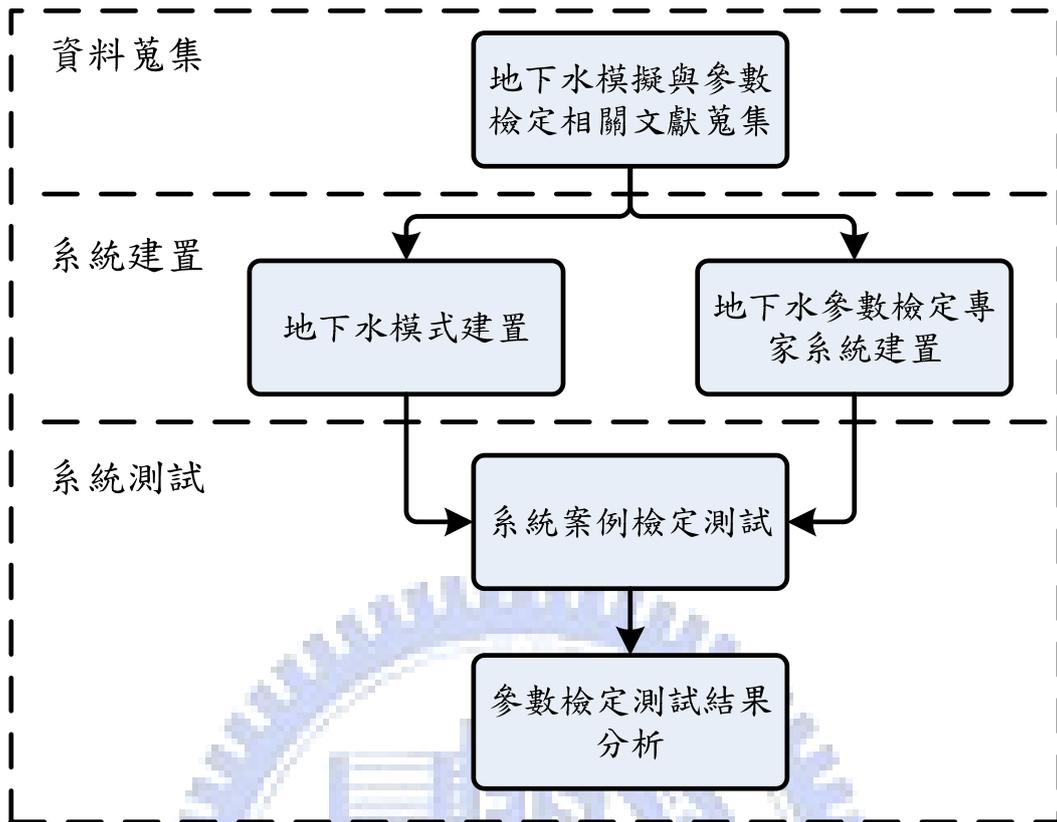
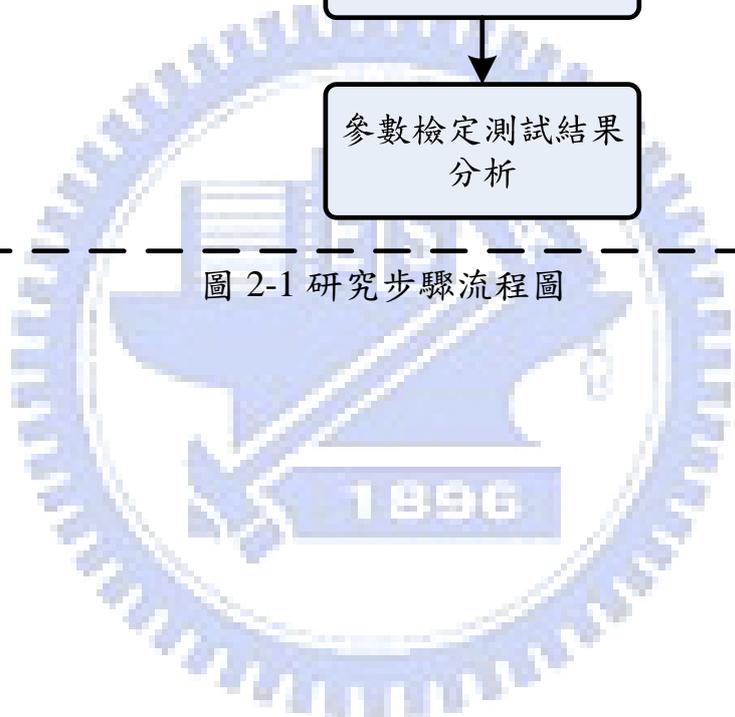


圖 2-1 研究步驟流程圖



## 第三章 研究方法

本研究應用 CLIPS 建置參數檢定專家系統並與地下水模擬模式 MODFLOW 整合，從而建立整個智慧型地下水參數檢定系統。以下 3.1 節將介紹系統架構，3.2 節與 3.3 節再分別介紹專家系統與 CLIPS。

### 3.1 智慧型地下水參數檢定系統架構

本研究發展之智慧型地下水參數檢定系統係建立在 Linux 作業系統之下，可分為參數檢定次系統及地下水模擬次系統，圖 3.1-1 為智慧型地下水參數檢定系統架構圖。

在參數檢定次系統(Parameter Calibration sub-System)部份，本研究採用 CLIPS 建立參數檢定之專家系統，此專家系統為參數檢定次系統之核心。本研究所建立之專家系統為規則式專家系統(rule-based expert system)，其透過推理機(inference engine)之推論機制並依據知識庫(knowledge base)中之規則(rules)推理出答案。由圖 3.1-1 所示，為與地下水模式整合，需建置專家系統之前後處理器，圖中之輸入前處理器功能為將專家系統所需之資訊匯整並傳送給專家系統推論核心，而專家系統輸出後處理器之功能為接收專家系統推論核心的輸出資訊，包含待檢定的參數及其修正量，再依據這些資訊輸出成參數修正檔，以提供地下水模擬次系統中之 MODFLOW 輸入轉譯器。

在地下水模擬次系統(Groundwater Simulation sub-System)部份，本研究選用 MODFLOW 做為此系統之地下水模擬模式。MODFLOW 輸入轉譯器之功能為讀取專家系統輸出後處理器所輸出之修正參數檔，再將所讀取之參數資訊依據 MODFLOW 之格式覆寫原本 MODFLOW 之 bcf.dat 與 wel.dat 檔；MODFLOW 輸出轉譯器之功能為將 MODFLOW 所輸出之二進位(binary)格式水位檔轉譯成

ASCII 格式水位檔，之後再由專家系統輸入前處理器讀取，以供專家系統進行參數檢定分析。

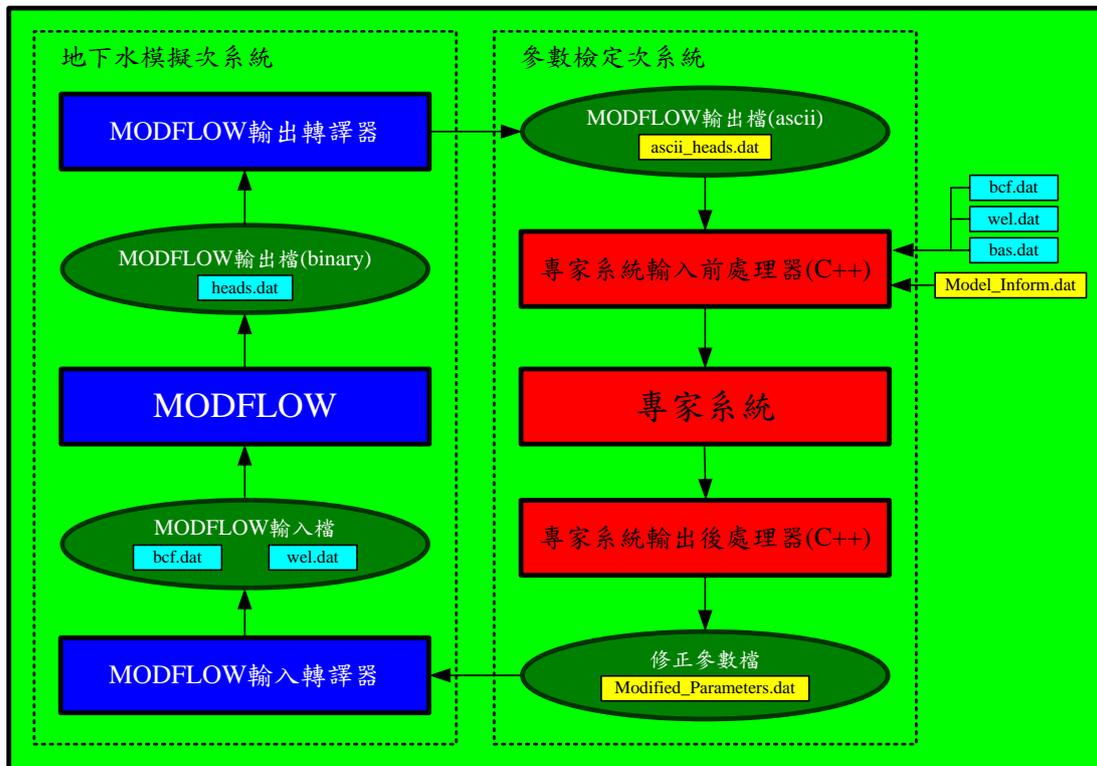


圖 3.1-1 智慧型地下水參數檢定系統架構圖

### 3.2 專家系統介紹

傳統的程式語言，如 C 或 Fortran 語言，一般皆作為資料處理之用（如數字或陣列之處理）。然而人類常使用抽象及象徵性的方法處理複雜的問題，這種抽象及象徵性的方法往往不適用於傳統的程式語言。雖然抽象的資訊仍然可用傳統的程式語言撰寫，但必須耗費大量的時間進行程式編撰才足以描述這些抽象資訊，以轉換這些抽象資訊成為可以使用的格式。

近年來人工智慧領域的研究結果已經發展出可具體化抽象資訊的技術，這項技術可讓程式表達得更接近人類邏輯，且更利於程式的發展與日後之維護。上述的電腦程式即為專家系統，具有能夠模仿人類專家解決複雜問題的能力。

Edward Feigenbaum 教授將專家系統定義為一個使用知識及推理過程解決問題的智慧型電腦程式，且這樣的問題是需要大量專家知識才得以解決的問題。也就是說，專家系統是一個模仿具有決策能力之人類專家的電腦系統。

專家系統係由知識庫(Knowledge Base)及推理引擎(Inference Engine)等兩個主要元件所組成。由規則(Rules)的方式表示知識之專家系統(Rule-based Expert System)是最常見的專家系統之一，這些儲存於知識庫中之規則，用來表示數組相對於給定情況的反應。每條規則皆由條件部分(conditional element)和動作部分(action element)所組成。條件部分為一系列的條件敘述，若這部份的敘述和事實(facts)相符，則執行(fire)此規則之動作部分。推理引擎會配對這些敘述與事實是否相符合，此過程稱為 patterns matching，每當規則的動作部分改變事實後，推理機便會再次執行 patterns matching 的動作，判斷哪些規則是可執行的，直到沒有任何條件部分的敘述符合事實為止。

### 3.3 CLIPS 介紹

CLIPS 是 C Language Integrated Production System 的縮寫，係由 NASA/Johnson Space Center 使用 C 程式語言所開發的工具。CLIPS 是一個提供了完整的環境方便於建立專家系統的工具，其支援了三種不同的程式編撰方法，分別為以規則為基礎(rule-based)、物件導向(object-oriented)及程序導向(procedural)等。以規則為基礎(Rule-based)的程式編撰方式允許了知識可以表示成啟發式的敘述，以指定對特定的情況做出動作；物件導向(Object-oriented)則是允許複雜的系統可以被拆解並模組化成數個元件，這些元件可以再用於建立其他的系統或

是其他元件；程序導向(Procedural)的程式編撰方式則是類似其他程式語言的程式碼有順序性，如 C、Java 及 FORTRAN 等等。另外，CLIPS 可以嵌入至別的程式語言，或是被當作子程式來呼叫，以方便與其他程式語言做整合。

本研究採用以規則為基礎(rule-based)及物件導向(object-oriented)的程式編撰方式建立專家系統。在以規則為基礎(Rule-based)的編撰方式上，本研究將地下水模式參數檢定之知識編製成數條規則，這些規則儲存於專家系統之知識庫，透過 patterns matching 執行規則內之動作。在物件導向(Object-oriented)的程式編撰方式上，本研究建立一個地下水類別，此類別中包含與參數檢定相關的屬性，如觀測水位標準差、模擬水位標準差等等，而此類別的實作則稱之為實例(instance)，每個實例皆具有類別所擁有的屬性。本研究以參數分區做為參數檢定的基本單位，並將一個參數分區實作為一個實例的方式進行地下水模式之參數檢定。

## 第四章 智慧型地下水參數檢定系統發展

本章主旨在於說明地下水智慧型參數檢定系統之參數檢定流程及系統內部各個元件之建立，以下將分為三節說明。首先於 4.1 節說明本系統參數檢定流程，其次 4.2 節為地下水模式自動化參數檢定系統建置，此部份分為兩小節，分別為地下水模擬次系統及參數檢定次系統建置，最後 4.3 節則為參數檢定規則說明。

### 4.1 參數檢定流程

本系統之參數檢定流程如圖 4.1-1 所示，在參數檢定開始後，系統首先初始化參數值如水力傳導係數(Hydraulic Conductivity,  $K$  值)及比出水量(Specific Yield,  $S_y$  值)等，及設定其他相關資訊如分區設定、分區與邊界相鄰判定、觀測水位與土壤種類等。

其次在完成初始參數設定後專家系統便先依據各種土壤種類，檢驗參數值是否在合理範圍，若其設定值超出該種土壤參數之上限值則設定其值為上限值，若超出下限值則設定該土壤參數值為下限值，接著再執行地下水模式 MODFLOW。在執行完地下水模式後，下一步驟為傳送參數檢定所需資訊至專家系統，這些資訊有檢定參數的各種指標(如水位標準差、淨流通量及水位平均值等)、參數值(如  $K$  值及  $S_y$  值與上一次調整前之  $K$  值及  $S_y$  值等)及土壤種類(如粉土、砂土及礫石等)。

將所需資訊傳送至專家系統後，系統接下來執行專家系統，專家系統依據知識庫中之規則(rules)集合，並搭配推理機(inference engine)之運作，而推論出修正參數的對象及方式，例如，依據調整  $S_y$  值之規則，若所給定事實(fact)為模擬水位標準差大於觀測水位標準差，而推理機在進行推論時發現此事實(fact)滿足調整  $S_y$  值之規則

的條件部分(conditional element)，便執行動作部分(action element)調大  $S_y$  值。

專家系統接著再檢驗由地下水模式所得到之模擬水位均方根誤差是否小於設定之容許誤差值，若是則停止參數檢定；若否則繼續執行參數檢定。

若檢驗發現有分區未完成參數檢定，則參數檢定系統將依據專家系統所得到之結果修改參數值，如專家系統得到結果之一為調大  $S_y$  值，則參數檢定系統依據此結果將  $S_y$  值調大，並將新的  $S_y$  值傳給地下水模式。緊接著再執行地下水模式 MODFLOW，並反覆執行上述動作，直到檢驗為完成參數檢定並停止系統。



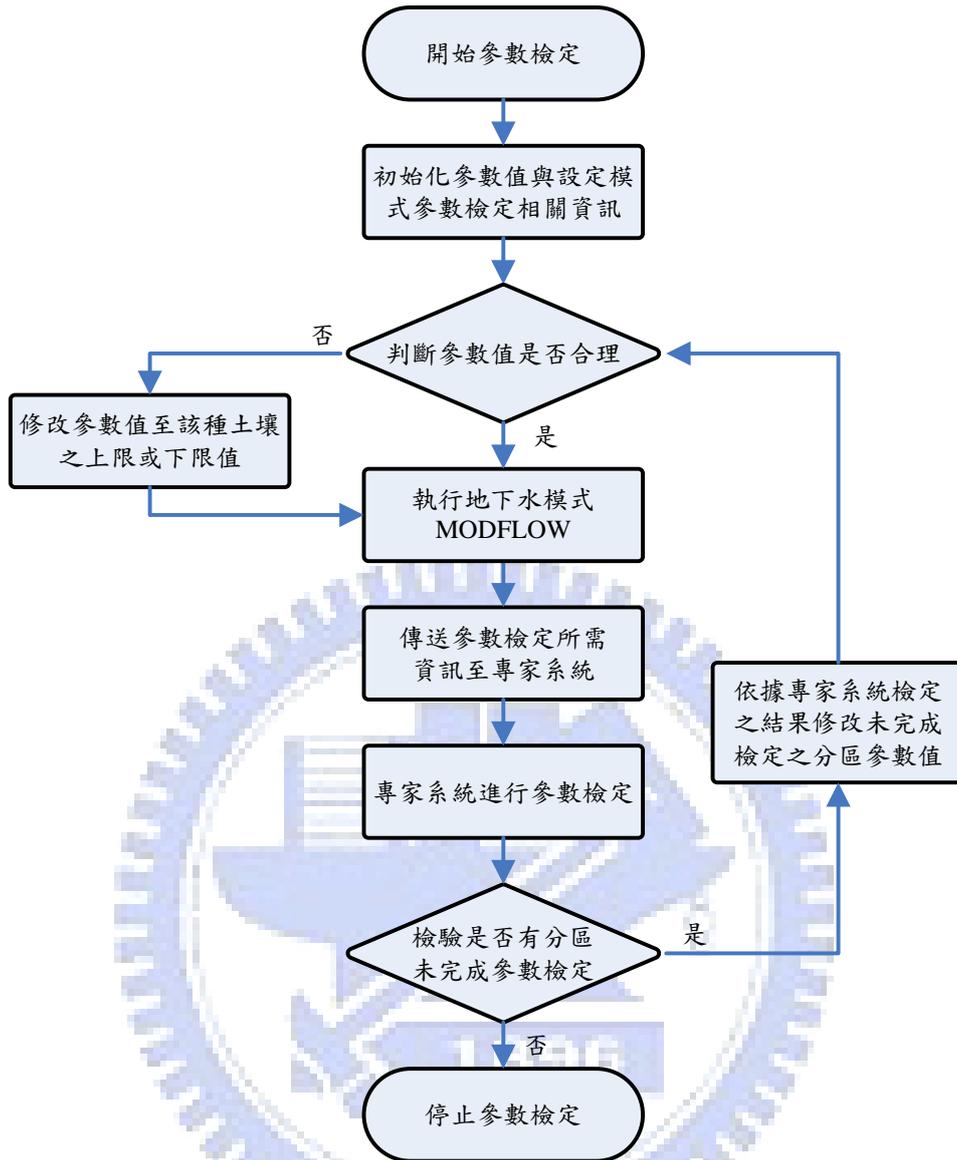


圖 4.1-1 參數檢定流程圖

## 4.2 地下水模式自動化參數檢定系統建置

本研究之地下水模式自動化參數檢定系統可分為兩個次系統，分別為地下水模擬次系統及參數檢定次系統，以下將分別說明此二次系統之建置

### 4.2.1 地下水模擬次系統建置

本研究選用 MODFLOW 做為地下水模擬次系統之地下水模擬

模式。MODFLOW 係由數個套件(package)所組成，每個套件再由數個模組(module)所組成，使用者可以選擇需要 MODFLOW 哪些功能而使用哪些套件，未被使用的套件則不啟動以節省電腦計算資源。本研究建立之模式則使用了 Basic Package(BAS)、Block-Centered Flow Package(BCF)及 Well Package(WEL)等三個套件。當 MODFLOW 執行時，MODFLOW 遂依據所啟用之套件，讀取所相對應之輸入檔，如 BAS 套件之輸入檔為 bas.dat、BCF 套件之輸入檔為 bcf.dat 及 WEL 套件之輸入檔為 wel.dat 等。在本次系統中，除了地下水模式外，並建置 MODFLOW 輸入轉譯器及 MODFLOW 輸出轉譯器，做為地下水模式 MODFLOW 之前後端介面。MODFLOW 輸入轉譯器之功能為讀取次系統外之資訊，再將所讀取之資訊依據 MODFLOW 格式覆寫至輸入檔，如 bcf.dat 與 wel.dat 等。MODFLOW 輸出轉譯器之功能為將 MODFLOW 所輸出之二進位(binary)格式水位資訊檔轉譯成 ASCII 格式水位檔，以供次系統外其他元件使用。

#### 4.2.2 參數檢定次系統建置

專家系統乃一模仿人類專家且具有決策能力的智慧型電腦系統，本研究採用 CLIPS(C Language Integrated Production System)建立地下水模式參數檢定專家系統，CLIPS 乃一方便採用物件導向概念以建立專家系統之工具，在本研究中，地下水模式以分區為概念進行參數檢定，一個分區即為一個物件，在 CLIPS 中則以建立實例(instance)的方式應用物件導向概念。在每個實例(物件)中，則有若干屬性(slot)代表各分區的特性，如土壤種類、K 值及 Sy 值的最大最小值、誤差容許值、邊界條件關係、參數 K 值及 Sy 值以及各種參數調整依據等。研究所建立之專家系統，乃將熟悉地下水模式參數檢定之人類專家所具有之經驗及知識轉換成規則(Rule)並將存放於知識庫(Knowledge

Base)，當專家系統對地下水模式進行參數檢定時，專家系統依據所輸入之情況並透過推理機(Inference Engine)對知識庫內之規則進行規則推論(Rule Inference)，其推理結果即為對所輸入問題之答案。本次系統在專家系統前後端建置專家系統前後處理器，以處理及傳遞專家系統前後端介面資訊，其中專家系統輸入前處理器功能為讀取次系統外資訊，再將專家系統所需資訊匯整傳送給專家系統推論核心，而專家系統輸出後處理器之功能為接收專家系統推論核心的輸出資訊，再依據這些資訊輸出至一輸出檔，以提供次系統外其他元件使用。

### 4.3 參數檢定規則說明

在建立專家系統之前，必須先搜集參數檢定之經驗及知識，或請教熟悉參數檢定之專家，在將所蒐集的知識歸納成規則並儲存於知識庫，專家系統依據知識庫之規則，再透過推理機制，以執行符合現況之規則，本研究建立數條規則，以供專家系統參數檢定之用。以下介紹五條本研究所建立之規則並舉例說明之，分別為參數值合理性檢測規則、各分區容許誤差值選定規則、水力傳導係數(Hydraulic Conductivity) 調整規則、比出水量(Specific Yield) 調整規則及各分區參數調整合理性檢測規則，附錄 B 為規則之完整程式碼。

#### 4.3.1 參數值合理性檢測規則

本研究之參數檢定系統加入土壤種類判釋功能，專家系統可依據土壤的種類，給予參數  $K$  及參數  $S_y$  之上限及下限值，而使參數無法超出此上下限，以確保該種土壤參數符合最基本之物理性質，譬如：

***If* 土壤種類為細砂**

***Then*  $K_{\max} = 17.28$**

**$K_{\min} = 0.01728$**

**$S_{\max} = 0.276$**

**$S_{\min} = 0.184$**

此條規則判斷土壤種類若為細砂，則給予 K 值之上下限分別為 17.28 及 0.01728 和  $S_y$  值之上下限分別為 0.276 及 0.184。

#### 4.3.2 各分區容許誤差值選定規則

本研究採用分區的概念檢定參數，每個分區皆可依據相鄰邊界之情況，以設定收斂標準為不同之容許誤差值，如相鄰定水頭邊界之分區，因定水頭邊界的影響最直接，且定水頭邊界之特性為水位維持不變，故此類分區水位較為穩定，給予分區較嚴格之容許誤差值；未與邊界相鄰之分區，由於沒有定水頭邊界之直接影響，水位較易變化大，故給予此類分區較寬鬆之容許誤差值；與不透水邊界相鄰之分區，設定之容許誤差值則介於前兩者之間。上述設定三類不同容許誤差值之作法，可表示成：

***If* 分區與定水頭邊界相鄰**

***Then* 容許誤差值為 0.5公尺**

***If* 分區未與邊界相鄰**

***Then* 容許誤差值為 1公尺**

***If* 分區與不透水邊界相鄰**

***Then* 容許誤差值為 0.75公尺**

此條規則判斷分區若與定水頭邊界相鄰，則給予此區容許誤差值為 0.5 公尺；若未與邊界相鄰則給予容許誤差值為 1 公尺；若與不透水

邊界相鄰則給予容許誤差值為 0.75 公尺。

#### 4.3.3 水力傳導係數(Hydraulic Conductivity)調整規則

調整水力傳導係數(K 值)之依據為平均淨流通量及平均觀測水位與平均模擬水位之比較，當平均淨流通量為正時，代表平均而言全時刻此分區為水流入之狀況，若此時平均模擬水位大於平均觀測水位，則代表流入過多的水，故調小 K 值，使得流入較少的水以達到模擬水位降低的效果，而調大 K 值則會有模擬水位升高的效果；相反的，當平均淨流通量為負時，代表平均而言全時刻此分區為水流出之狀況，若需要使模擬水位升高，則應調小 K 值，使得流出此區的水較少，調大 K 值則會使模擬水位降低。舉例來說：

**If 平均淨流通量 > 0 and  
平均模擬水位 > 平均觀測水位  
Then 將K值乘以0.9**

此條規則判斷若平均淨流通量為正，且平均模擬水位大於平均觀測水位，則將 K 值乘以 0.9。

#### 4.3.4 比出水量(Specific Yield)調整規則

調整比出水量( $S_y$  值)之依據為模擬水位標準差與觀測水位標準差之比較，若模擬水位標準差比觀測水位標準差大，則認為模擬水位在全時刻變化太劇烈，這時應調大  $S_y$  值，讓單位地下水層能夠容納更多的水，以使得水位變化較緩和，達到模擬水位標準差變小的效果；相反而論，若模擬水位標準差較觀測水位標準差為小，則應調小  $S_y$  值，以使得水位變化較為劇烈，且達到模擬水位標準差變大之效果。上述規則可表示成：

**If 模擬水位標準差 > 觀測水位標準差**  
**Then 將 $S_y$ 值乘以1.1**

此條規則判斷若模擬水位標準差大於觀測水位標準差，則將  $S_y$  值乘以 1.1。

#### 4.3.5 各分區參數調整合理性檢測規則

除了定水頭邊界會對相鄰分區水位有穩定的效果外，分區與分區之間水位也會互相影響，若相鄰分區對水位的影響夠強烈，以致於調整一次的參數值對水位影響之效果被覆蓋掉，而造成水位與預期的結果相反，譬如，在平均淨流通量為正的情況下，調大 K 值應可使水位上升，但由於相鄰分區的影響，可能反而使水位下降，此時則回復此區參數至上一次調整前之參數值。舉例來說：

**If 上一次平均淨流通量 > 0 and**  
**當次K > 上一次K and**  
**當次模擬水位 < 上一次模擬水位**  
**Then 將當次K值回覆至上一次調整前之K值**

此條規則判斷，若上一次平均淨流通量為正，且 K 值大於上一次 K 值，且模擬水位小於上一次模擬水位，則將當次 K 值回復至上一次調整前之 K 值。檢定  $S_y$  值時之情況則為：

**If 上一次模擬水位標準差 > 當次模擬水位標準差 and**  
**當次 $S_y$  < 上一次 $S_y$**   
**Then 將當次 $S_y$ 值回覆至上一次調整前之 $S_y$ 值**

此條規則判斷，若上一次模擬水位標準差大於當次模擬水位標準差，且當次  $S_y$  值小於上一次  $S_y$  值，則將當次  $S_y$  值回復至上一次調整前之  $S_y$  值。

#### 4.3.6 參數大幅調整規則

若參數經過多次檢定後仍不能完成參數檢定，則大幅度調整參數值。舉例來說：

**If** 參數調整次數  $> 10$  *and*  
水位均方根誤差  $>$  容許誤差值

**Then** 將K值乘以2及0.5並保留水位均方根誤差較佳者

此條規則判斷，若經過 10 次的參數檢定後水位均方根誤差仍大於容許誤差值，則將 K 值乘以 2 及 0.5，並比較兩者之水位均方根誤差，最後保留水位均方根誤差較佳之 K 值。



## 第五章 參數檢定系統應用測試

前述智慧型地下水參數檢定系統建置，將透過以下四種案例之測試以檢驗本參數檢定系統之效果，其中將針對水力傳導係數 (Hydraulic Conductivity, K 值) 之檢定(案例 I)、比出水量 (Specific Yield,  $S_y$  值) 之檢定(案例 II) 及同時進行 K 值和  $S_y$  值之檢定(案例 III 與案例 VI) 等建立不同案例，表 5-1 為案例列表。其中案例 VI 區域較案例 III 為大，分區數目也較多，在進行參數檢定上亦相對不易，因此可再次對本參數檢定系統之實用性進行檢驗。

案例測試皆分為兩大步驟，第一步驟為觀測資料之模擬準備與參數目標值之設定，此步驟首先建立一完整地下水模式，需設定模式網格大小及數目、含水層型態(受壓或非受壓)、邊界條件(定水頭邊界或不透水邊界)、含水層頂及底之高程、模擬時刻數及各時刻之長度、時間單位、穩態或暫態模擬、初始水頭、觀測井位置、參數 K 及  $S_y$  值及抽水井位置與抽水量等。上述模式執行後所得之模擬水位，即為後續各案例測試之觀測水位，而所給定之 K 及  $S_y$  值即為後續各案例測試待檢定參數(K 及  $S_y$ ) 之目標值。第二步驟則為案例檢定測試，此步驟之地下水模式，除了待檢定參數(K 或  $S_y$  值) 之外，其餘皆與上述第一步驟之地下水模式完全一樣，而此步驟之觀測水位即為第一步驟模式模擬所得之水位。於最後測試結果分析時，則將第一步驟之參數目標值與第二步驟檢定所得之參數值相比較。

各測試案例之收斂標準為各區參數之均方根誤差，當該區之均方根誤差小於設定之容許誤差值時，則停止調整該區參數，待全部分區皆停止調整參數時，則完成參數檢定，各區檢定參數之均方根誤差為：

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^T (h_i^{sim} - h_i^{obs})^2}{T}}$$

其中， $T$  為總時刻數， $h_i^{sim}$  為模擬水位， $h_i^{obs}$  為觀測水位，而全區之均方根誤差總和為各區之均方根誤差和。

以下各案例之檢定後參數值誤差百分比、 $K$  值調整過程圖、 $S_y$  值調整過程圖、平均模擬水位變化圖及模擬水位標準差變化圖其縱座標皆表示為誤差百分比(%), 此誤差百分比為與目標值之誤差百分比，其計算方法為：

$$\text{誤差百分比(\%)} = (P - P_T) / P_T * 100$$

其中  $P$  為各參數( $K$ 、 $S$ 、平均模擬水位、模擬水位標準差)， $P_T$  為各參數之目標值。

表 5-1 案例列表

	區域大小	分區數	待檢定之參數
案例 I	2200m×2200m	9	$K$
案例 II	2200m×2200m	9	$S_y$
案例 III	2200m×2200m	9	$K$ 及 $S_y$
案例 IV	4000m×4000m	36	$K$ 及 $S_y$

## 5.1 水力傳導係數(Hydraulic Conductivity)檢定測試

### ● 案例 I

#### 案例說明：

本案例用以驗證檢定 K 值之相關規則的正確性，案例為 2200 公尺見方之模擬區域，每個網格之長與寬皆為 200 公尺，共計 121 個(11×11)正方形網格，含水層為非受壓水層(Unconfined aquifer)。

在邊界條件方面，左方及右方為不透水邊界，上方及下方為定水頭邊界且水位高在 50 公尺；在分區方面，本案例總共分為 9 個分區，每個分區皆為 9 個網格，如圖 5.1-1 所示。本案例為暫態模擬，總共模擬 40 個時刻，每個時刻為 5 天總計 200 天。

在參數設定方面，整體模擬區域初始水位高皆為 50 公尺，而 K 值及  $S_y$  值則如表 5.1-1 所示，由於只單獨檢定參數 K 值，故  $S_y$  值設定為原始之參數目標值而不再調整，K 值則給定一初始值，待完成參數檢定後，檢定後之 K 值再與其目標值做比較。

本案例之抽水位置配置為每個網格皆抽水，圖 5.1-2 所示為各區中一個網格之抽水量，而分區內之各網格抽水量皆相同。本案例容許之誤差值為 0.1 公尺。

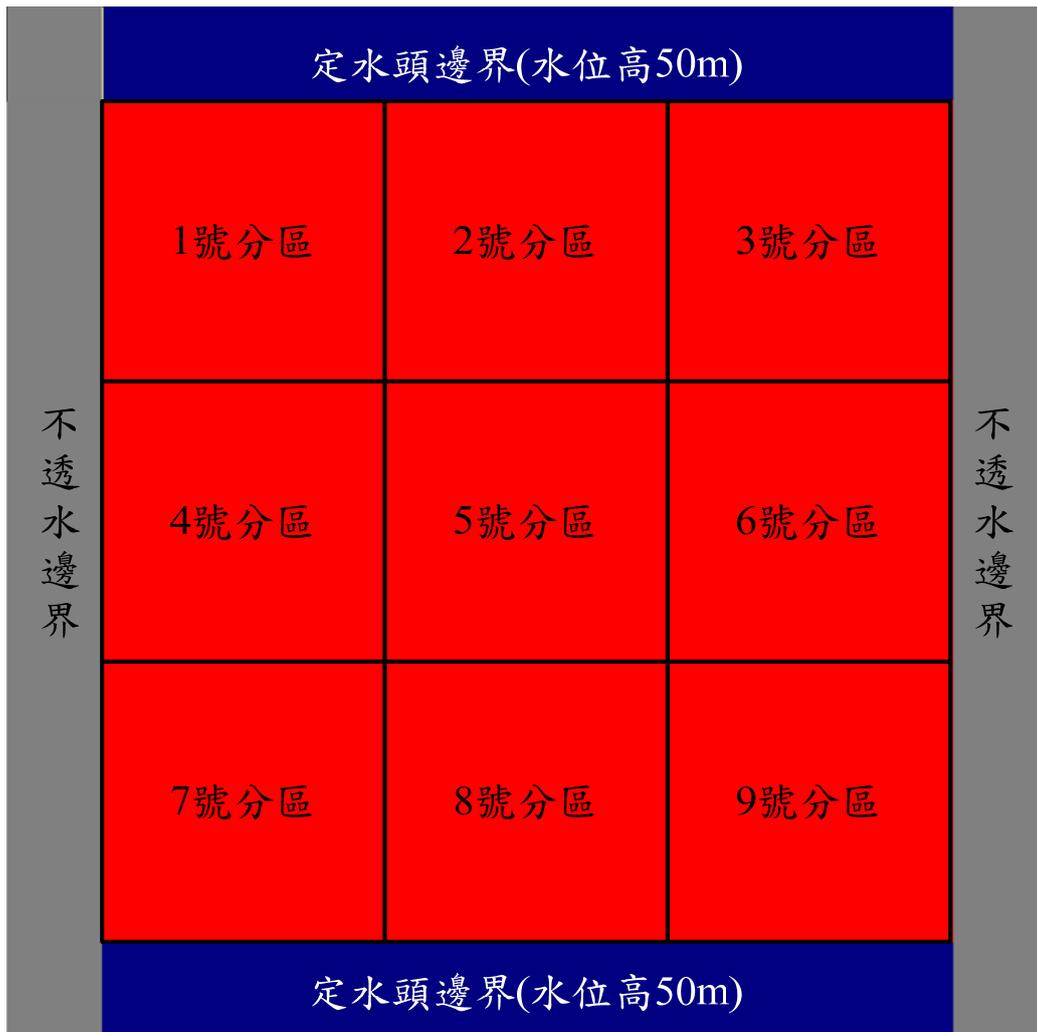


圖 5.1-1 分區與邊界配置圖(案例 I)

表 5.1-1 參數設定表(案例 I)

	目標值 K(m/day)	目標值 $S_y$	初始值 K(m/day)
1 號分區	40	0.3	60
2 號分區	15	0.23	22.5
3 號分區	25	0.25	37.5
4 號分區	13	0.22	19.5
5 號分區	35	0.26	52.5
6 號分區	15	0.25	22.5
7 號分區	35	0.28	52.5
8 號分區	12	0.2	18
9 號分區	42	0.32	63

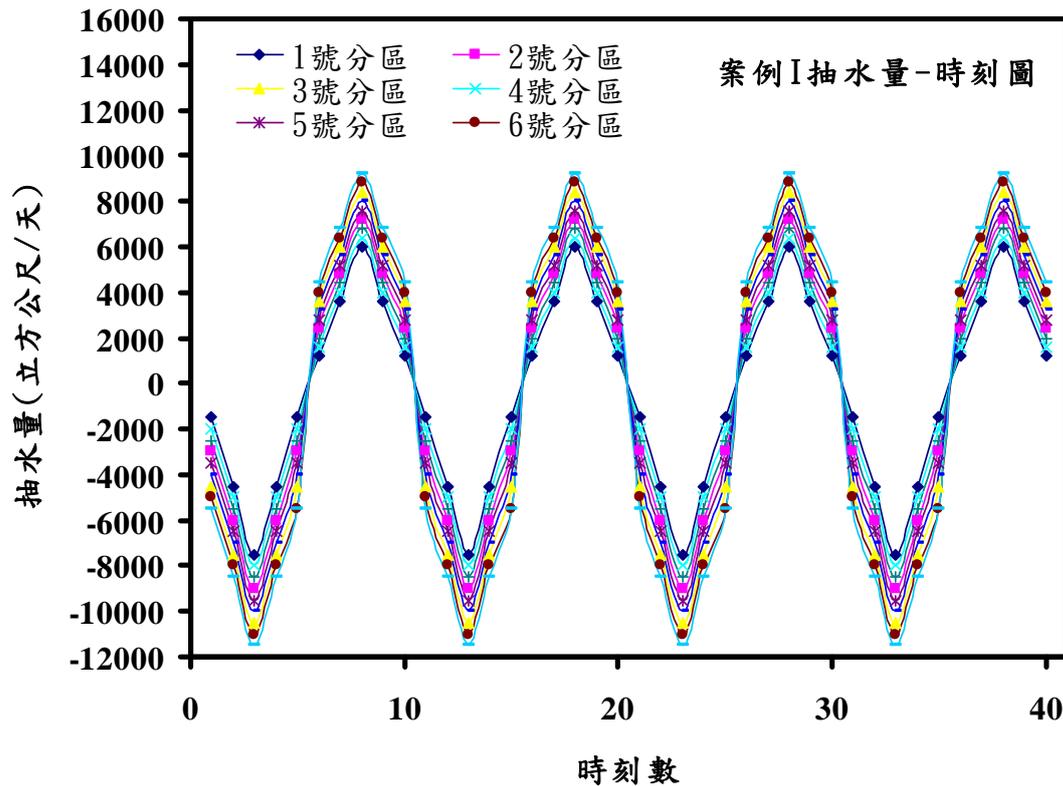


圖 5.1-2 抽水量-時刻圖(案例 I)

**參數檢定結果：**

表 5.1-2 為完成參數檢定後之 K 值成果表，再經過參數檢定後，各分區之 K 值皆能接近目標值，如此亦證明本研究「水力傳導係數 (Hydraulic Conductivity) 調整規則」之設計為可行。圖 5.1-3 為參數檢定結束後之各區水位均方根誤差圖，圖 5.1-4 則為全區水位均方根誤差總和圖，由圖顯示出各區及全區之水位均方根誤差皆隨著 K 值逐步檢定而下降，最後全區水位均方根誤差值為 0.54 公尺，而各區之水位均方根誤差值皆在 0.1 公尺以下。

圖 5.1-5 及圖 5.1-6 分別為 2 號分區及 3 號分區之水位-時刻圖，圖中所示參數檢定前之各時刻模擬水位皆與觀測之水位明顯分離，在 2 號分區中，觀測水位與模擬水位之最大水位差值為 1.74 公尺，3 號分區為 1.69 公尺，而參數檢定後之各時刻模擬水位與觀測之水位幾乎重疊，經計算 2 號分區兩者最大水位差值為 0.07 公尺，3 號分區也

為 0.07 公尺，由此可知在完成 K 值參數檢定後，模擬水位較檢定前改善許多。

圖 5.1-7 及圖 5.1-8 為 2 號分區及 3 號分區之 K 值調整過程圖，由圖所示，K 值在參數檢定過程中誤差隨著調整次數而下降，依據「水力傳導係數(Hydraulic Conductivity)調整規則」，若模擬水位平均值大於觀測水位平均值，且淨流通量為正，則調小 K 值，反之則調大 K 值。圖 5.1-9 及圖 5.1-10 分別為 2 號分區及 3 號分區之平均模擬水位變化圖，由圖所示，此兩區第一次至第四次參數調整之平均模擬水位皆高於觀測水位，故第二次至第五次參數調整皆調小 K 值。

表 5.1-2 參數結果表(案例 I)

	目標值 K (m/day)	初始 K 值 (m/day)	參數檢定後 K 值 (m/day)	檢定後 K 值誤 差百分比(%)
1 號分區	40	60	39.37	-1.575
2 號分區	15	22.5	14.76	-1.6
3 號分區	25	37.5	24.6	-1.6
4 號分區	13	19.5	12.79	-1.61538
5 號分區	35	52.5	34.45	-1.57143
6 號分區	15	22.5	14.76	-1.6
7 號分區	35	52.5	34.45	-1.57143
8 號分區	12	18	11.81	-1.58333
9 號分區	42	63	41.33	-1.59524

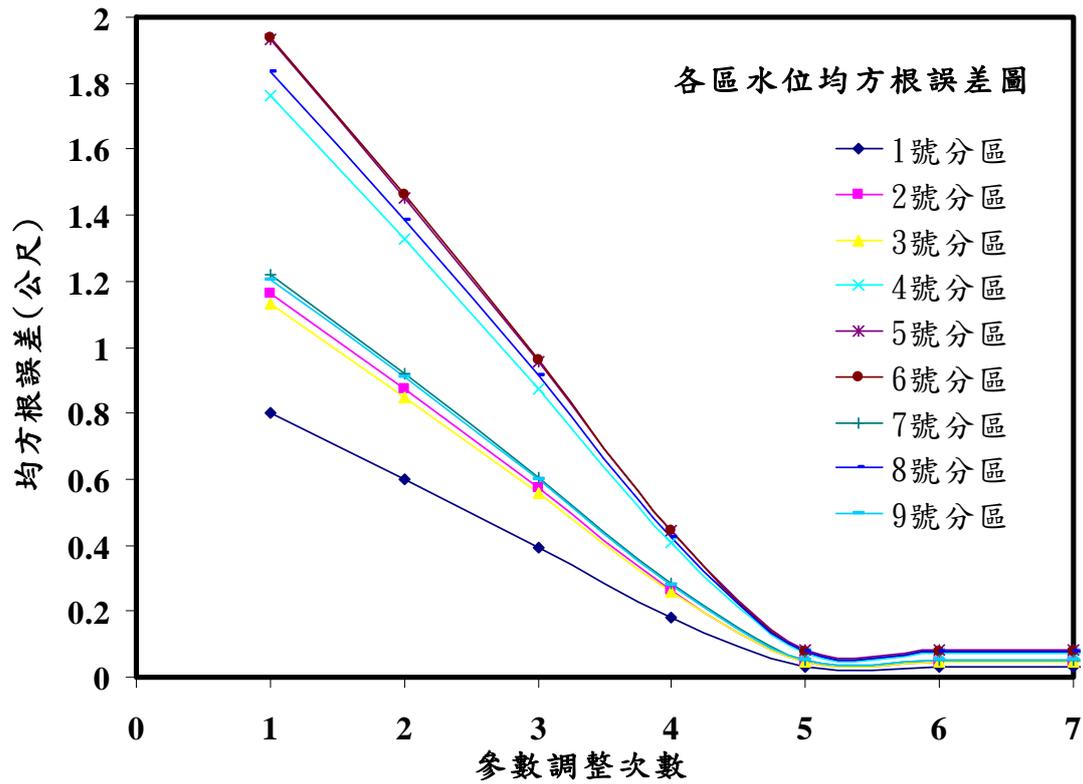


圖 5.1-3 各區水位均方根誤差圖(案例 I)

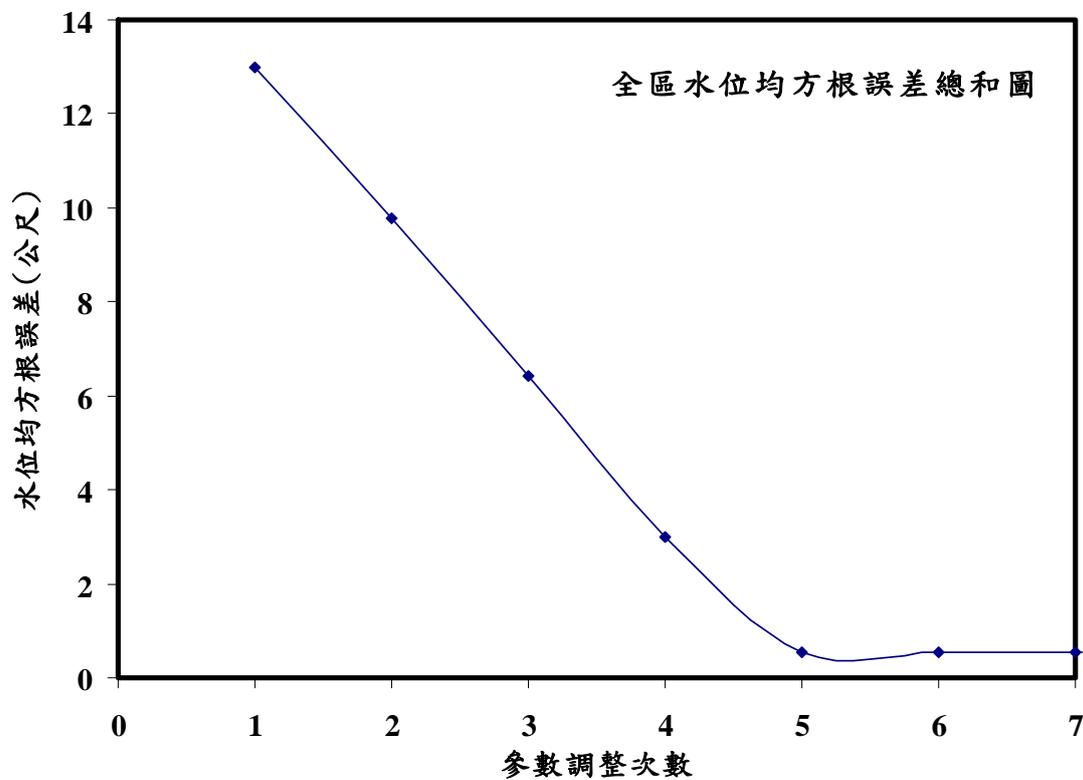


圖 5.1-4 全區水位均方根誤差圖(案例 I)

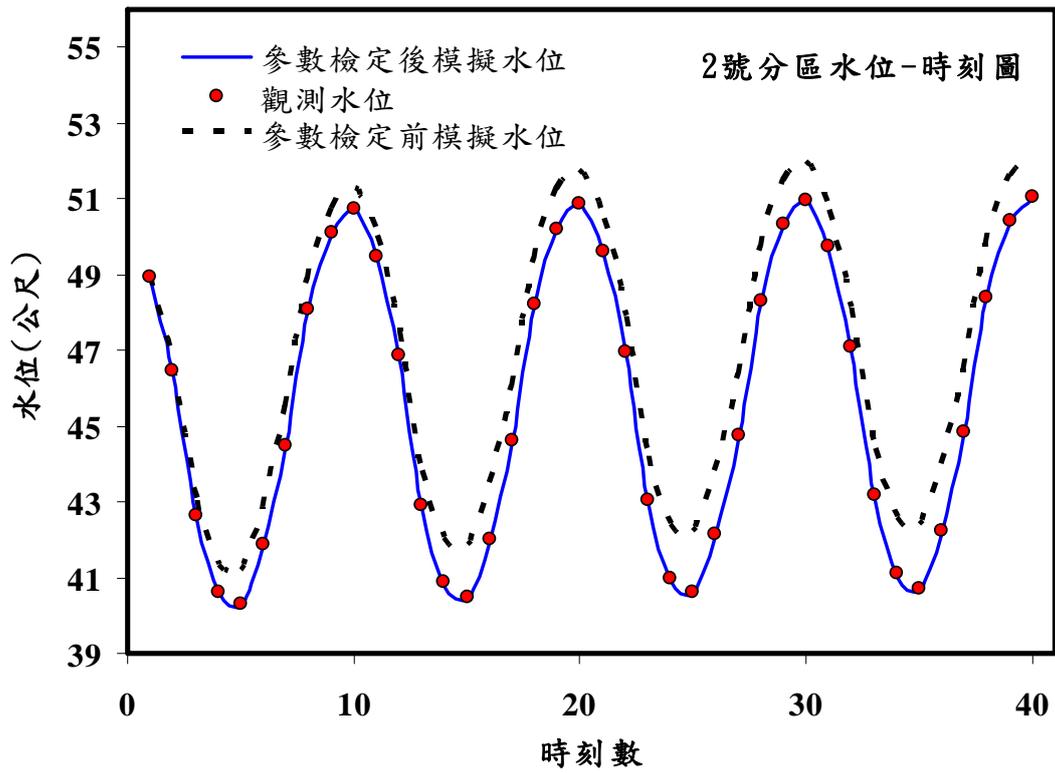


圖 5.1-5 2 號分區水位-時刻圖(案例 I)

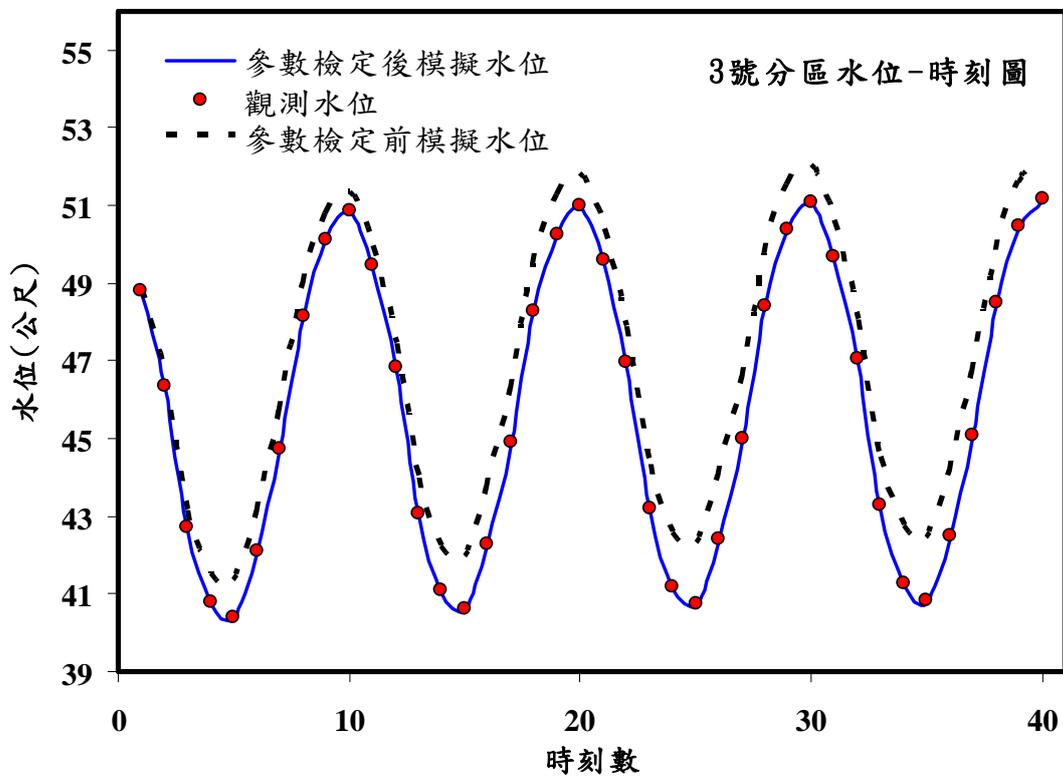


圖 5.1-6 3 號分區水位-時刻圖(案例 I)

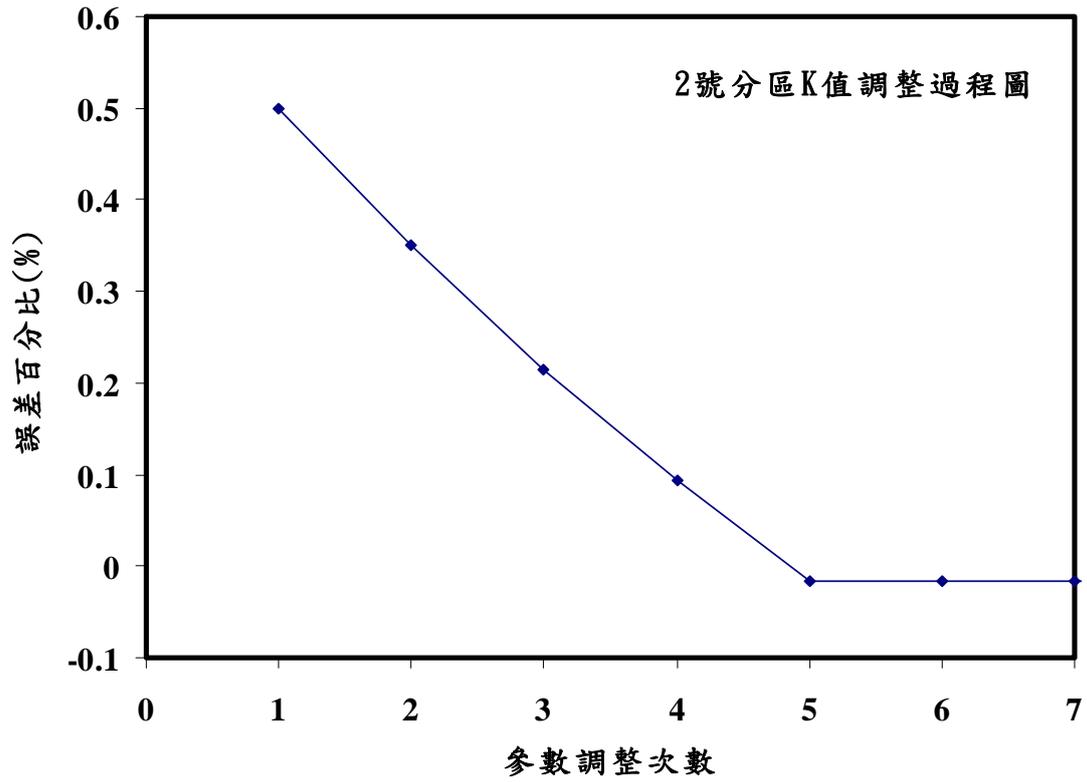


圖 5.1-7 2 號分區 K 值調整過程圖(案例 I)

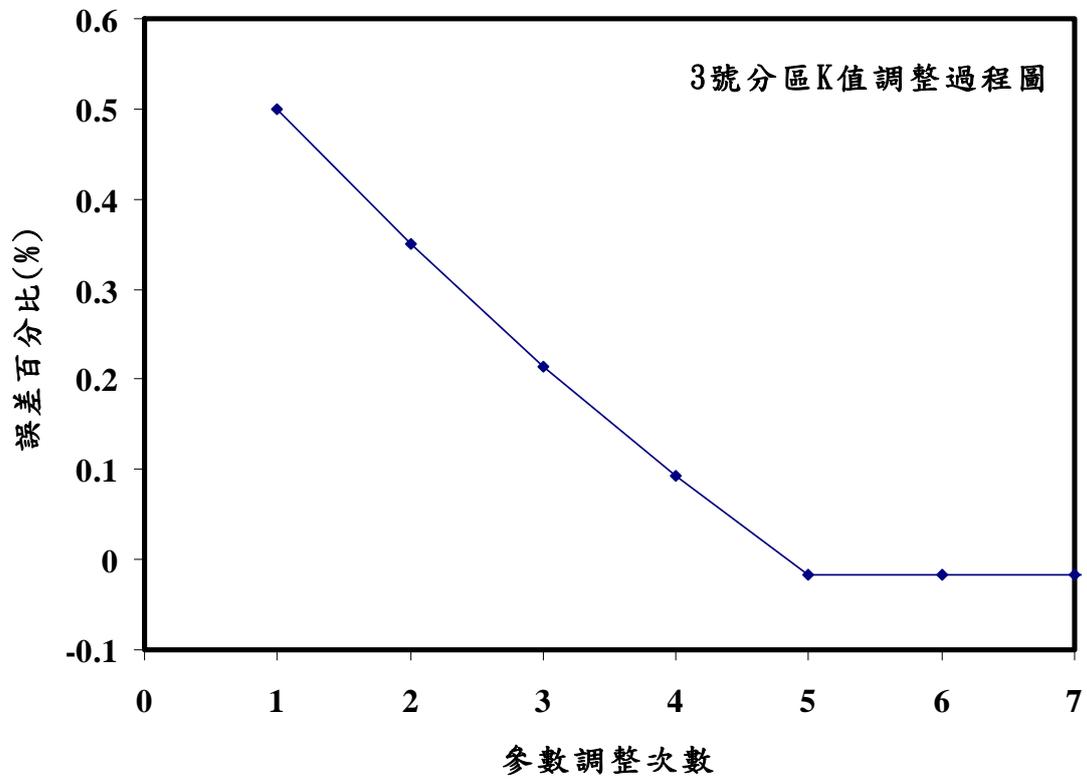


圖 5.1-8 3 號分區 K 值調整過程圖(案例 I)

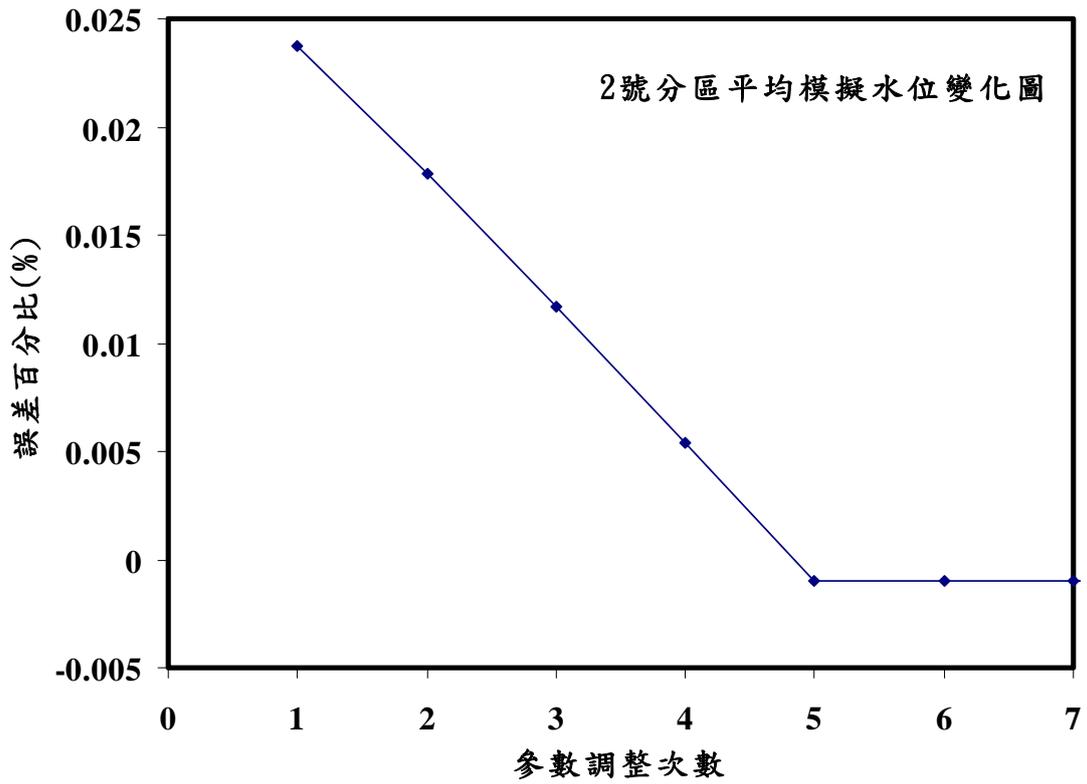


圖 5.1-9 2 號分區平均模擬水位變化圖(案例 I)

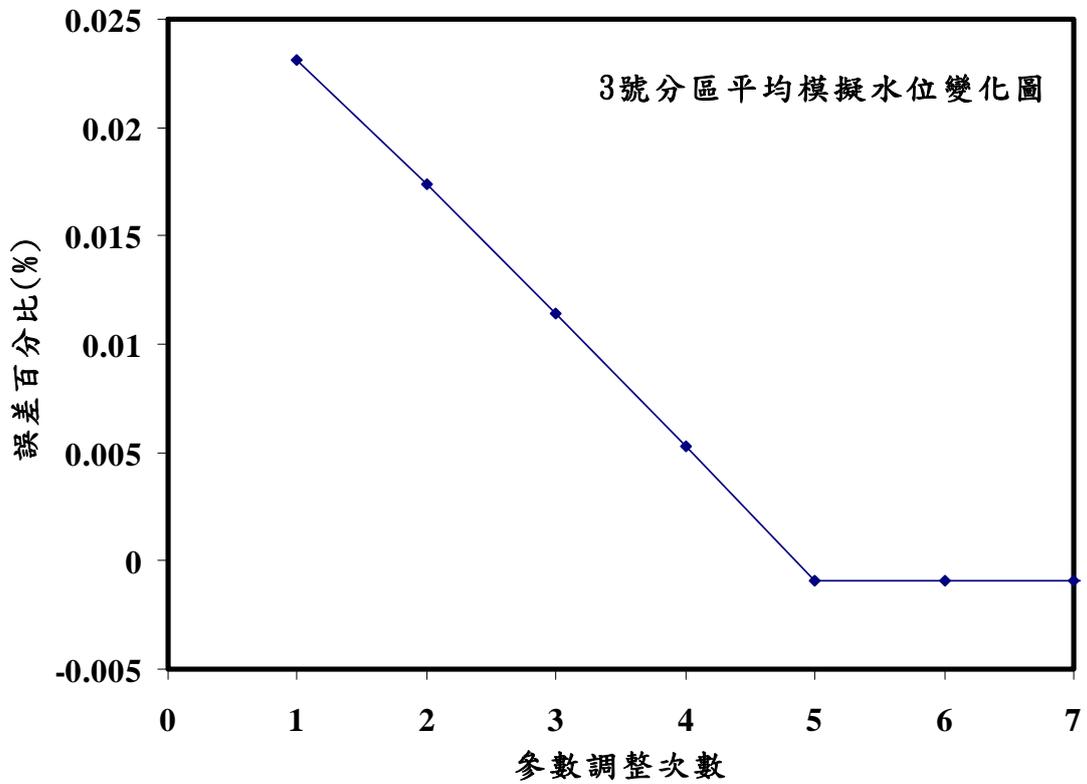


圖 5.1-10 3 號分區平均模擬水位變化圖(案例 I)

## 5.2 比出水量(Specific Yield)檢定測試

### ● 案例 II

#### 案例說明：

本案例用以驗證參數檢定  $S_y$  值之相關規則之正確性。本案例本案例所設定之容許誤差值為 0.1 公尺，K 值及  $S_y$  值之設定如表 5.2-1 所示，由於只單獨檢定參數  $S_y$  值，故 K 值設定目標值不調整，而  $S_y$  值則設定初始值，待完成參數檢定後之  $S_y$  值再與目標值  $S_y$  做比較，其餘案例設定皆與案例 I 相同。

表 5.2-1 參數設定表(案例 II)

	目標值 K(m/day)	目標值 $S_y$	初始值 $S_y$
1 號分區	40	0.26	0.5
2 號分區	15	0.3	0.1
3 號分區	25	0.25	0.5
4 號分區	13	0.29	0.1
5 號分區	35	0.26	0.5
6 號分區	15	0.23	0.1
7 號分區	35	0.27	0.5
8 號分區	12	0.21	0.1
9 號分區	42	0.2	0.5

#### 參數檢定結果與討論：

表 5.2-2 為完成參數檢定後之  $S_y$  值成果表，如表所示，各分區經過參數檢定後，各區之  $S_y$  值與初始  $S_y$  值相比皆能接近目標值，如此亦證明本研究「比出水量(Specific Yield)調整規則」之設計為可行。圖 5.2-1 為參數檢定結束後之各區水位均方根誤差圖，圖 5.2 -2 為全區水位均方根誤差總和圖，由圖可知各區及全區之水位均方根誤差皆隨著  $S_y$  值逐步調整而下降，最後全區水位均方根誤差值為 0.53 公尺，

而各區之水位均方根誤差值皆在 0.1 公尺以下。

圖 5.2-3 及圖 5.2-4 分別為 6 號分區及 8 號分區之水位-時刻圖，圖中所示參數檢定前之各時刻模擬水位與觀測水位明顯分離，6 號分區觀測水位與模擬水位之最大差值為 10.95 公尺，8 號分區為 14.56 公尺，而參數檢定後之模擬水位則與觀測之水位幾乎重疊，6 號分區兩者之最大水位差值為 0.09 公尺，8 號分區為 0.18 公尺，由此可知在完成  $S_y$  值參數檢定後，模擬水位較檢定前改善許多。

圖 5.2-5 及圖 5.2-6 為 6 號分區及 8 號分區之  $S_y$  值調整過程圖，如圖所示，此兩區在參數檢定後之  $S_y$  值較參數檢定前為大，因此土層所能蓄存之水量變多，而形成參數檢定後較檢定前之水位平緩之結果，如圖 5.2-3 及圖 5.2-4 所示。

圖 5.2-7 及圖 5.2-8 為 6 號分區及 8 號分區模擬水位標準差變化圖，由圖 5.2-5 可看出 6 號分區在第四次調整  $S_y$  值後呈現震盪，至第十六次後才呈現平穩狀態，此現象可解釋為，依據「比出水量(Specific Yield)調整規則」，當模擬水位標準差大於觀測水位標準差時則調大  $S_y$  值，相反則調小  $S_y$  值，而在第四次調整後，模擬水位標準差較觀測水位標準差小，所以第五次要調大  $S_y$  值，在第五次調整後，模擬水位標準差則反過來大於觀測水位標準差，所以第六次要調小  $S_y$  值，如此反覆調整直到第十六次後 6 號分區水位均方根誤差小於設定之容許誤差值，方才停止調整 6 號分區  $S_y$  值。

8 號分區也有與上述 6 號分區相似之現象，在第三次調整  $S_y$  值之後至第十三次均為震盪之現象，也可如此解釋，圖 5.2-8 所示為 8 號分區模擬水位標準差變化圖。

而由圖 5.2-1 也可看出隨著  $S_y$  值調整，6 號分區及 8 號分區之水位均方根誤差也呈現震盪之現象，直至停止調整  $S_y$  值為止。

表 5.2-2 參數結果表(案例 II)

	$S_y$ 目標值	$S_y$ 初始值	參數檢定後 $S_y$ 值	檢定後 $S_y$ 值誤差百分比(%)
1 號分區	0.26	0.5	0.285	9.615385
2 號分區	0.3	0.1	0.287	-4.33333
3 號分區	0.25	0.5	0.256	2.4
4 號分區	0.29	0.1	0.287	-1.03448
5 號分區	0.26	0.5	0.264	1.538462
6 號分區	0.23	0.1	0.231	0.434783
7 號分區	0.27	0.5	0.272	0.740741
8 號分區	0.21	0.1	0.212	0.952381
9 號分區	0.2	0.5	0.201	0.5

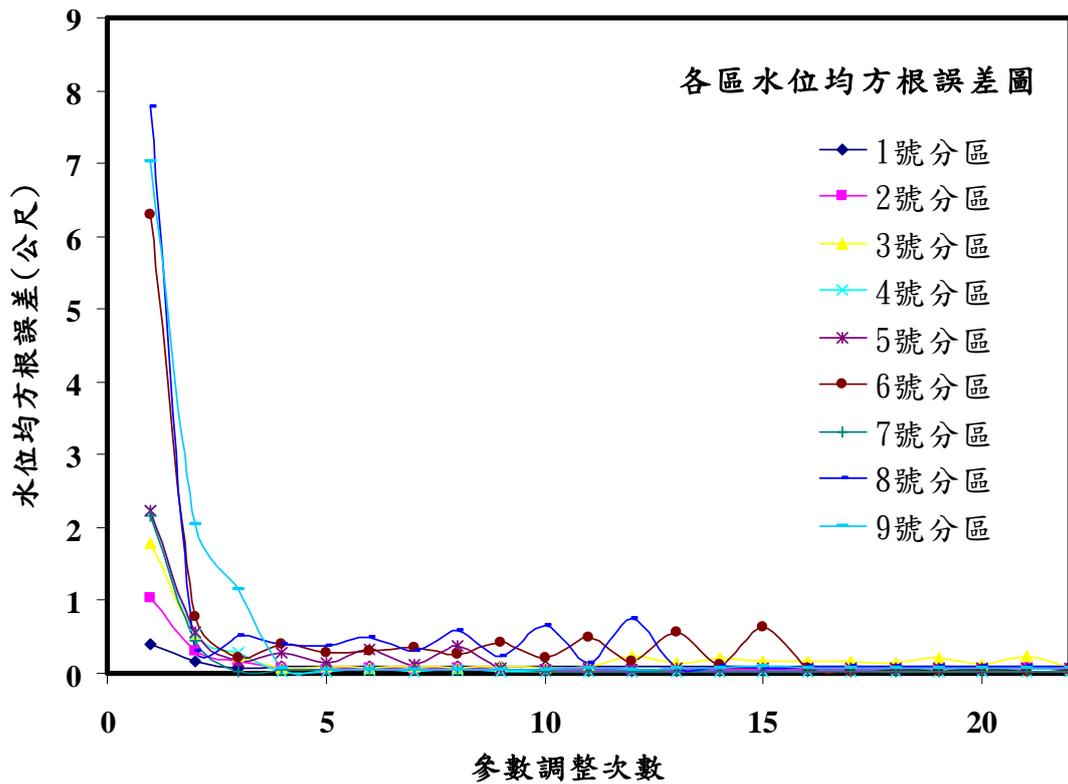


圖 5.2-1 各區水位均方根誤差圖(案例 II)

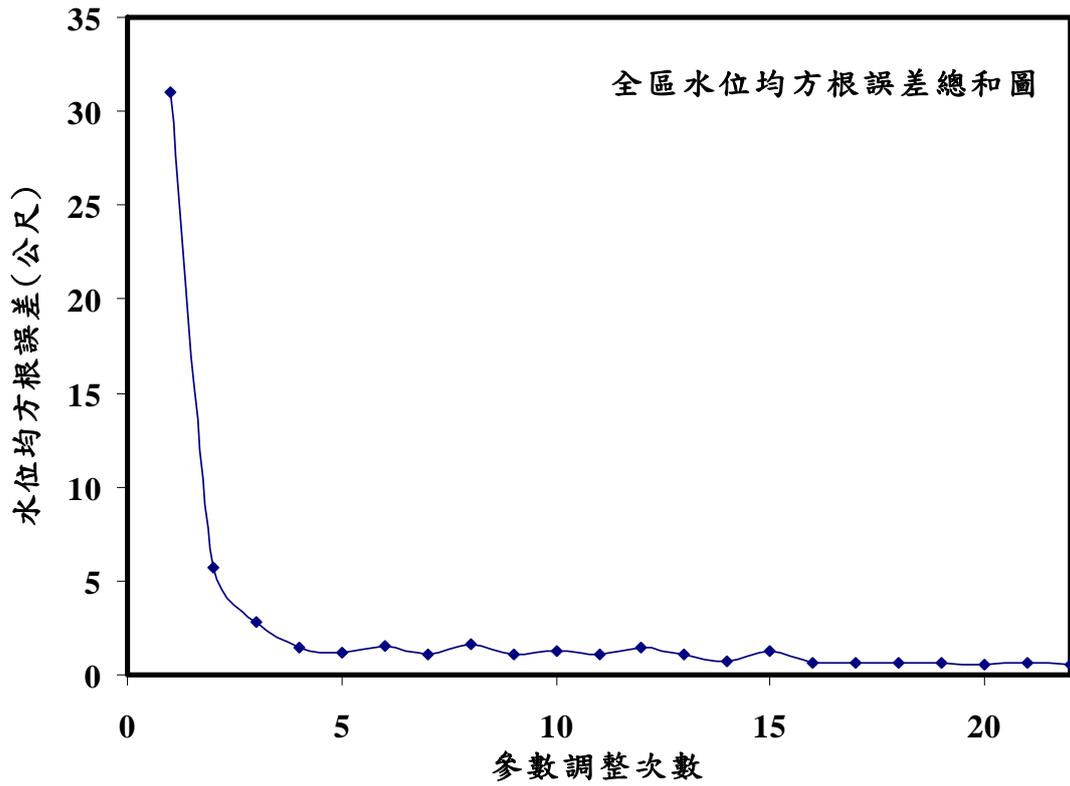


圖 5.2-2 全區水位均方根誤差圖(案例 II)

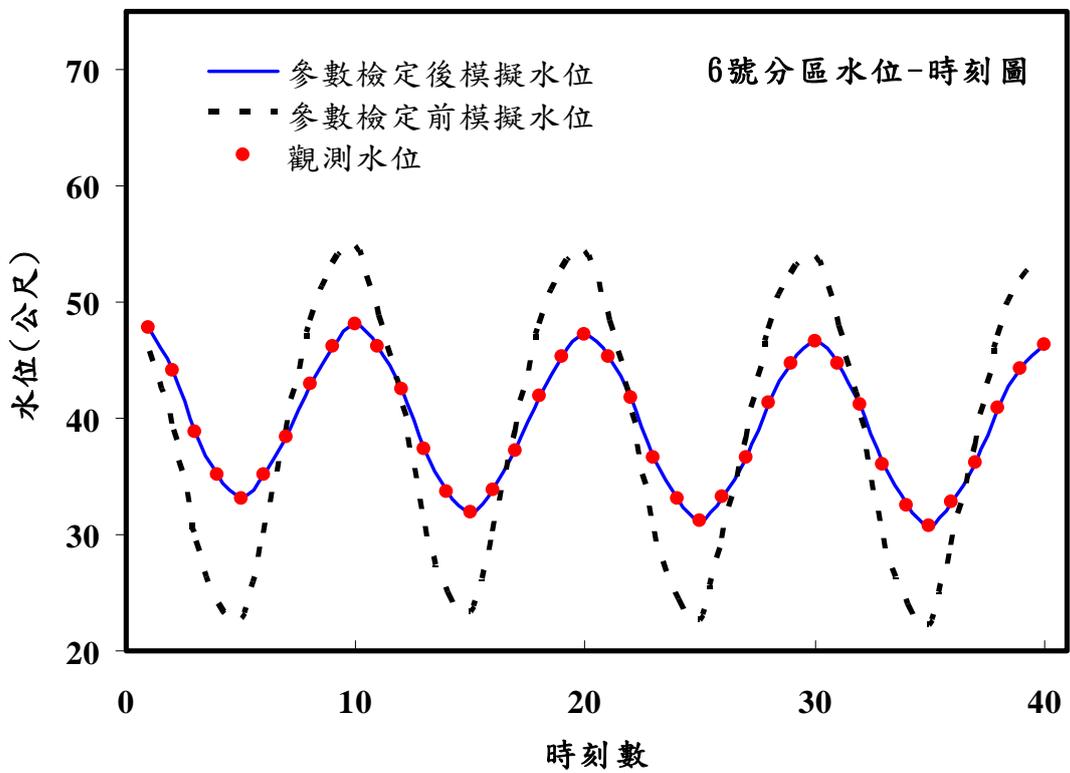


圖 5.2-3 6號分區水位-時刻圖(案例 II)

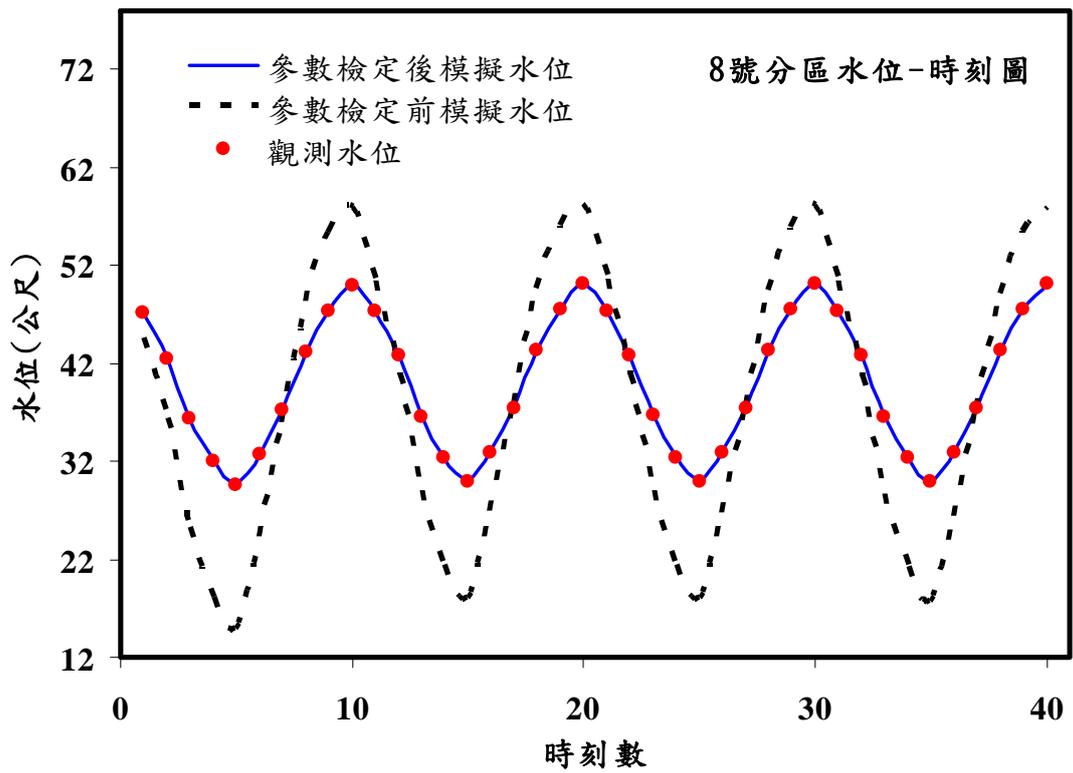


圖 5.2-4 8 號分區水位-時刻圖(案例 II)

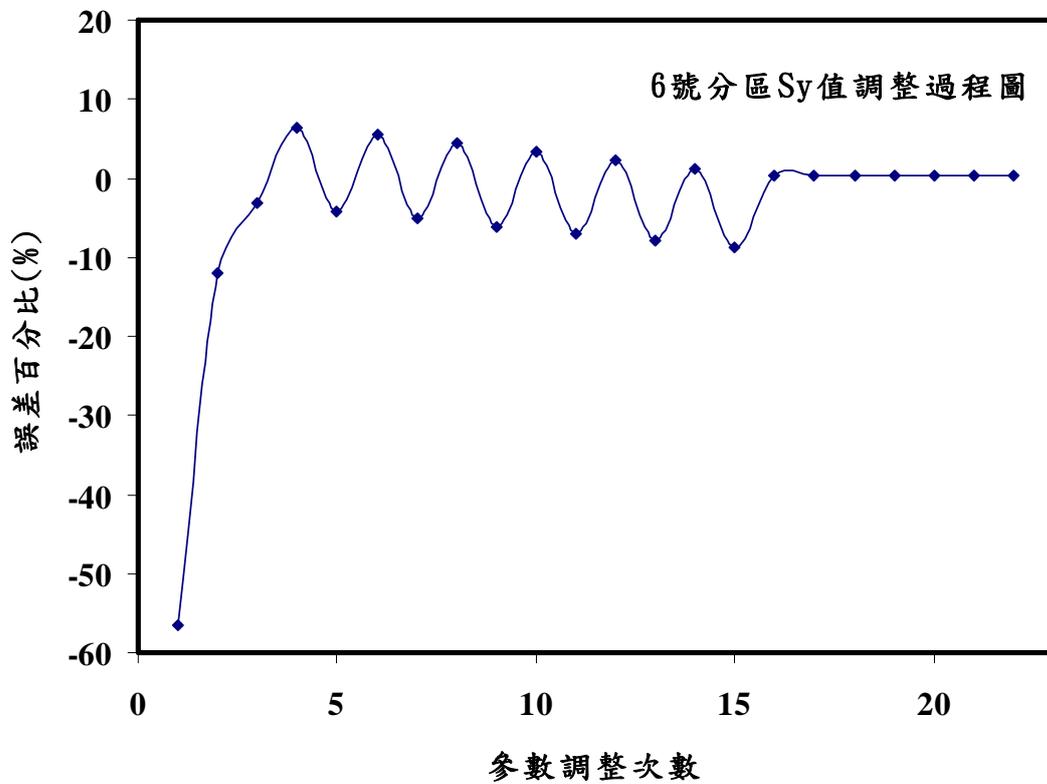


圖 5.2-5 4 號分區 Sy 值調整過程圖(案例 II)

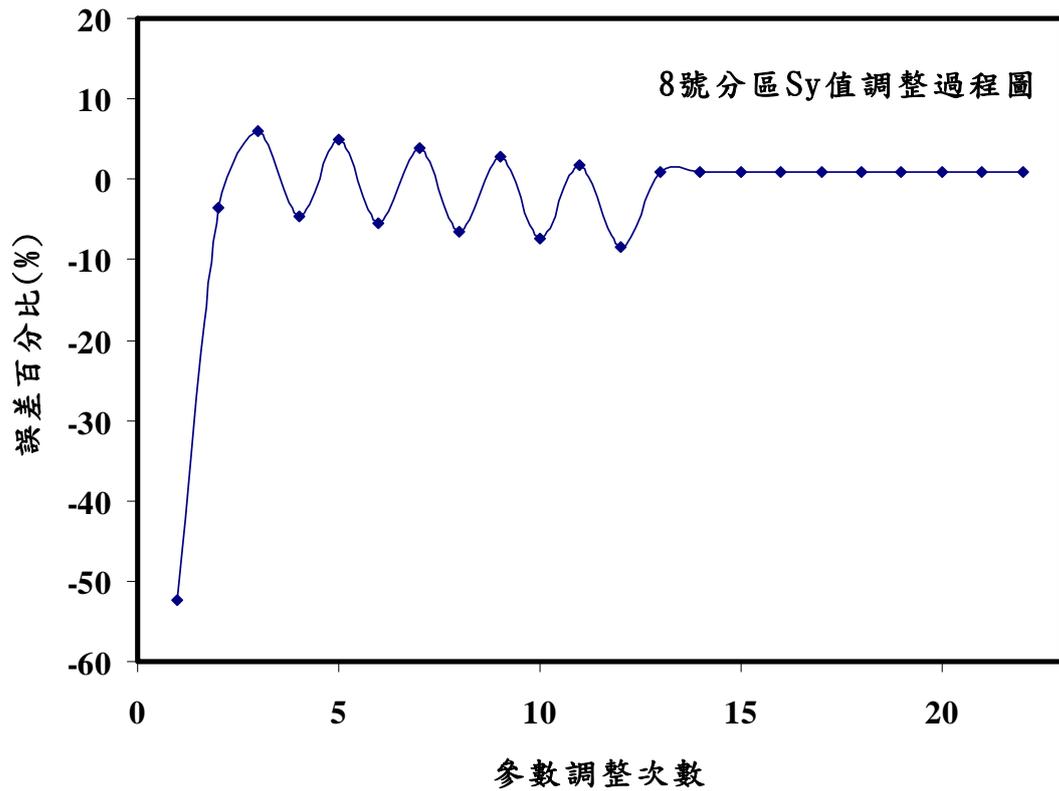


圖 5.2-6 8 號分區 Sy 值調整過程圖(案例 II)

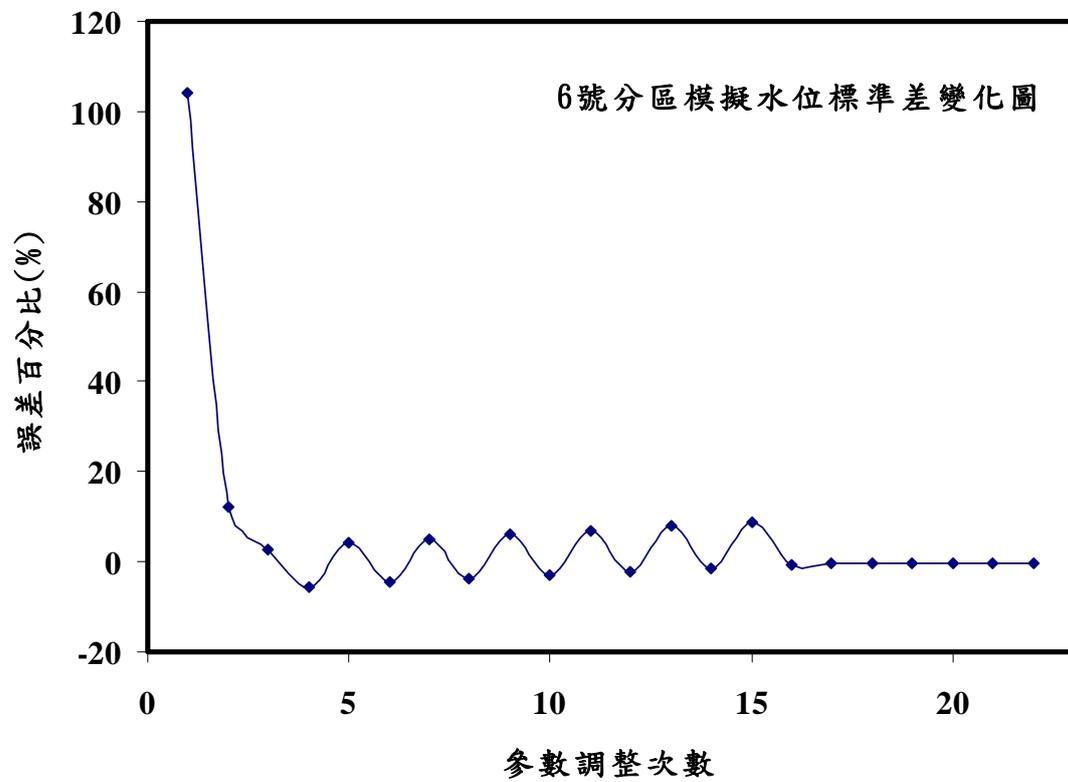


圖 5.2-7 6 號分區模擬水位標準差變化圖(案例 II)

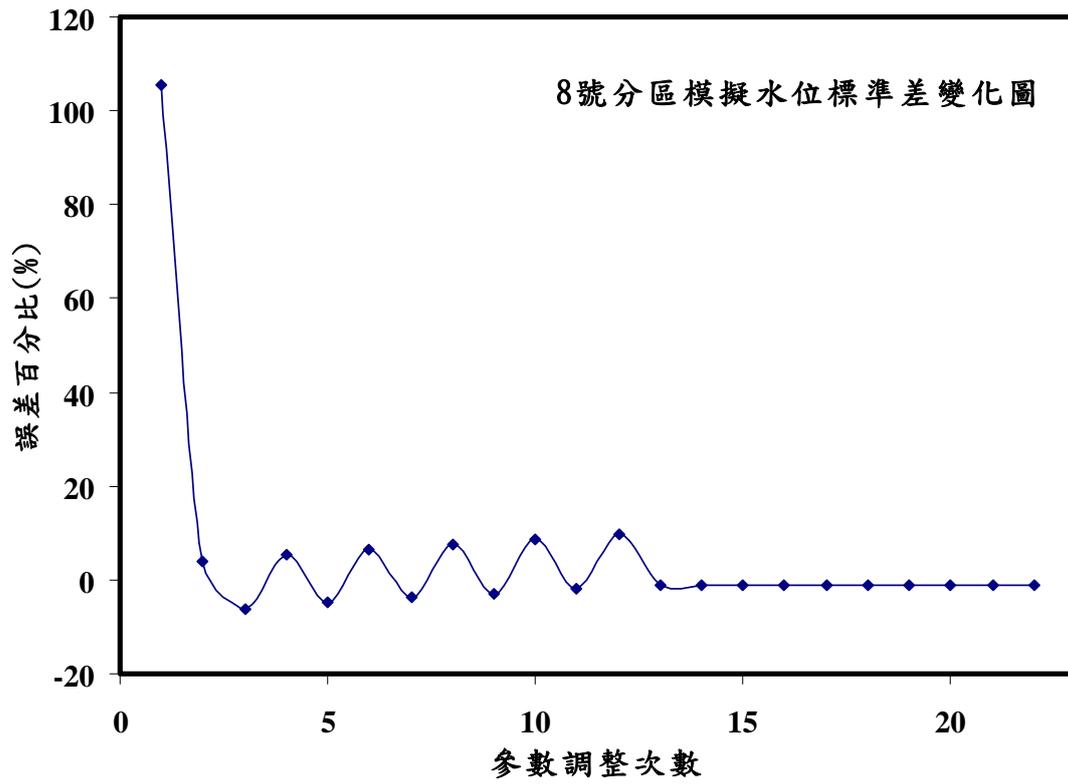


圖 5.2-8 8 號分區模擬水位標準差變化圖(案例 II)



### 5.3 水力傳導係數(Hydraulic Conductivity)與比出水量 (Specific Yield)檢定測試

#### ● 案例 III

##### 案例說明：

本案例用以驗證同時參數檢定  $S_y$  值及  $K$  值相關規則之正確性。本案例所設定之容許誤差值為 0.2 公尺， $K$  值及  $S_y$  值之設定如表 5.3-1 所示， $K$  值及  $S_y$  值皆設定初始值，待完成參數檢定後再與目標  $K$  值及目標  $S_y$  值做比較，其餘模式設定皆與案例 I 相同。

表 5.3-1 參數設定表(案例 III)

	目標值 $K(m/day)$	目標值 $S_y$	初始值 $K(m/day)$	初始值 $S_y$
1 號分區	40	0.3	60	0.1
2 號分區	15	0.23	10	0.6
3 號分區	25	0.25	20	0.6
4 號分區	13	0.22	19.5	0.6
5 號分區	35	0.26	52.5	0.1
6 號分區	15	0.25	10	0.6
7 號分區	35	0.28	52.5	0.1
8 號分區	12	0.2	18	0.6
9 號分區	42	0.32	63	0.1

##### 參數檢定結果：

表 5.3-2 及表 5.3-3 為完成參數檢定後之  $K$  值及  $S_y$  值成果表，如表所示，各分區經過參數檢定後，各區之  $K$  值及  $S_y$  值皆能接近目標值，如此亦證明本研究「比出水量(Specific Yield)調整規則」及「水力傳導係數(Hydraulic Conductivity)調整規則」之設計在同時進行雙參數檢定時亦為可行。圖 5.3-1 為參數檢定結束後之各區水位均方根誤差圖，圖 5.3-2 為全區水位均方根誤差總和圖，可看出各區及全區之

水位均方根誤差皆隨著 K 值及  $S_y$  值逐步檢定而下降，最後全區水位均方根誤差值為 1.29 公尺，而各區之水位均方根誤差值皆在 0.2 公尺以下。

圖 5.3-3 及圖 5.3-4 分別為 8 號分區及 9 號分區之水位-時刻圖，如圖所示，參數檢定前之 8 號分區及 9 號分區各時刻之模擬水位與觀測水位明顯分離，模擬水位與觀測水位之最大水位差值分別可達 8.36 公尺及 5.72 公尺，而參數檢定後之各時刻模擬水位與觀測之水位幾乎重疊，兩者最大水位差值分別為 0.24 公尺及 0.1 公尺，由此可看出參數檢定後水位檢定前改善許多。

圖 5.3-5 及圖 5.3-6 為 8 號分區及 9 號分區之 K 值調整過程圖，由圖所示，此兩區在參數檢定後之 K 值較參數檢定前為小，且經計算淨流通量皆為正，因此流入此兩區之水量經調整 K 值後變少，而形成檢定後之模擬水位較檢定前為低，如圖 5.3-3 及圖 5.3-4 所示。

依據「水力傳導係數(Hydraulic Conductivity)調整規則」，若模擬水位平均值大於觀測水位平均值，且淨流通量為正，則調小 K 值，反之則調大 K 值。圖 5.3-7 及圖 5.3-8 為 8 號分區及 9 號分區平均模擬水位變化圖，由圖 5.3-7 所示，在第五次調整參數後模擬水位平均值大於觀測水位平均值，而在第六次調整參數後模擬水位平均值則大於觀測水位平均值，且經計算淨流通量皆為正，故 8 號分區在第五次調小 K 值，而在第六次則調大 K 值，如圖 5.3-5 所示。

圖 5.3-9 及圖 5.3-10 為 8 號分區及 9 號分區之  $S_y$  值調整過程圖，由圖 5.3-9 所示，8 號分區在參數檢定後之  $S_y$  值較檢定前為小，因此土層所能蓄存之水量變少，而形成檢定後之模擬水位較檢定前震盪劇烈，如圖 5.3-3 所示。由圖 5.3-10 所示，9 號分區在參數檢定後之  $S_y$  值較檢定前為大，因此土層所能蓄存之水量變多，而形成檢定後之水

位較檢定前平緩，如圖 5.3-4 所示。

依據「比出水量(Specific Yield)調整規則」，當模擬水位標準差大於觀測水位標準差時則調大  $S_y$  值，相反則調小  $S_y$  值。圖 5.3-11 及圖 5.3-12 分別為 8 號分區及 9 號分區之模擬水位標準差變化圖，如圖 5.3-11 所示，在第四次調整參數後，模擬水位標準差較觀測水位標準差小，所以第五次要調大  $S_y$  值，在第五次調整後，模擬水位標準差則反過來大於觀測水位標準差，所以第六次要調小  $S_y$  值，8 號分區  $S_y$  值調整過程如圖 5.3-9 所示。

表 5.3-2 參數 K 結果表(案例 III)

	目標值 K(m/day)	初始值 K(m/day)	參數檢定後 K 值	檢定後 K 值誤 差百分比(%)
1 號分區	40	60	43.74	9.35
2 號分區	15	10	13.31	-11.2667
3 號分區	25	20	26.62	6.48
4 號分區	13	19.5	12.79	-1.61538
5 號分區	35	52.5	42.1	20.28571
6 號分區	15	10	11.98	-20.1333
7 號分區	35	52.5	37.14	6.114286
8 號分區	12	18	12.47	3.916667
9 號分區	42	63	41.33	-1.59524

表 5.3-3 參數  $S_y$  結果表(案例 III)

	目標值 $S_y$	初始值 $S_y$	參數檢定後 $S_y$ 值	檢定後 $S_y$ 值誤差百分 比(%)
1 號分區	0.3	0.1	0.287	-4.33333
2 號分區	0.23	0.6	0.245	6.521739
3 號分區	0.25	0.6	0.245	-2
4 號分區	0.22	0.6	0.224	1.818182
5 號分區	0.26	0.1	0.259	-0.38462
6 號分區	0.25	0.6	0.256	2.4
7 號分區	0.28	0.1	0.279	-0.35714
8 號分區	0.2	0.6	0.2	0
9 號分區	0.32	0.1	0.316	-1.25

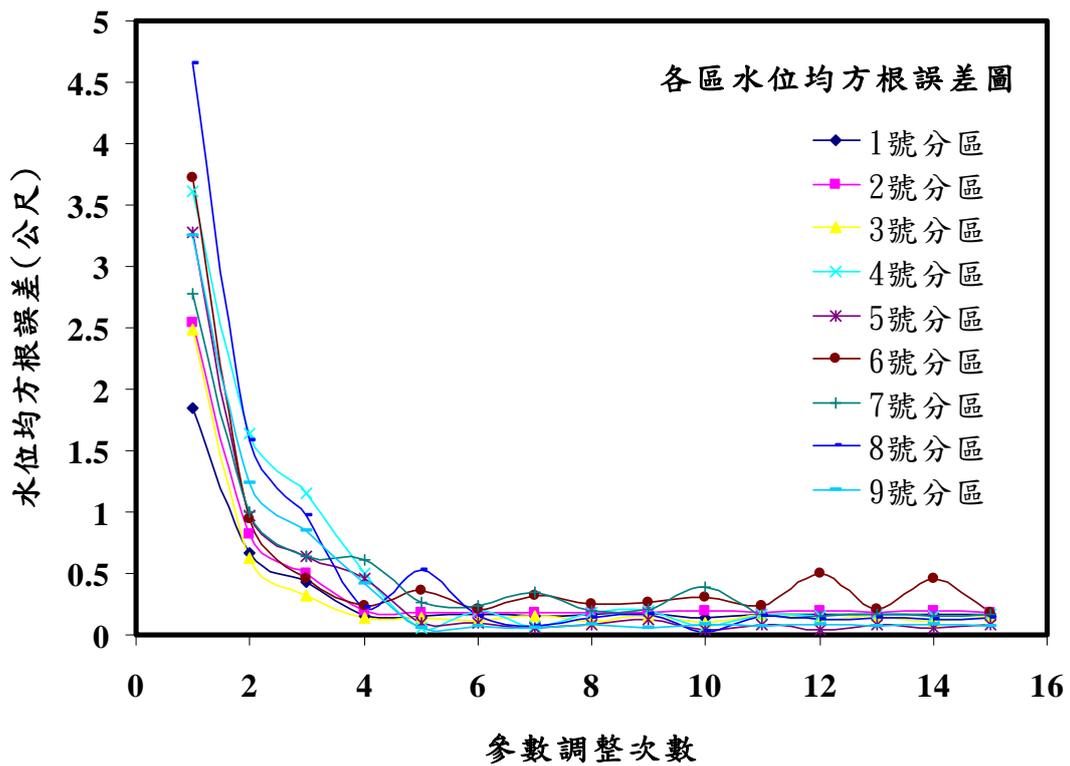


圖 5.3-1 各區水位均方根誤差圖(案例 III)

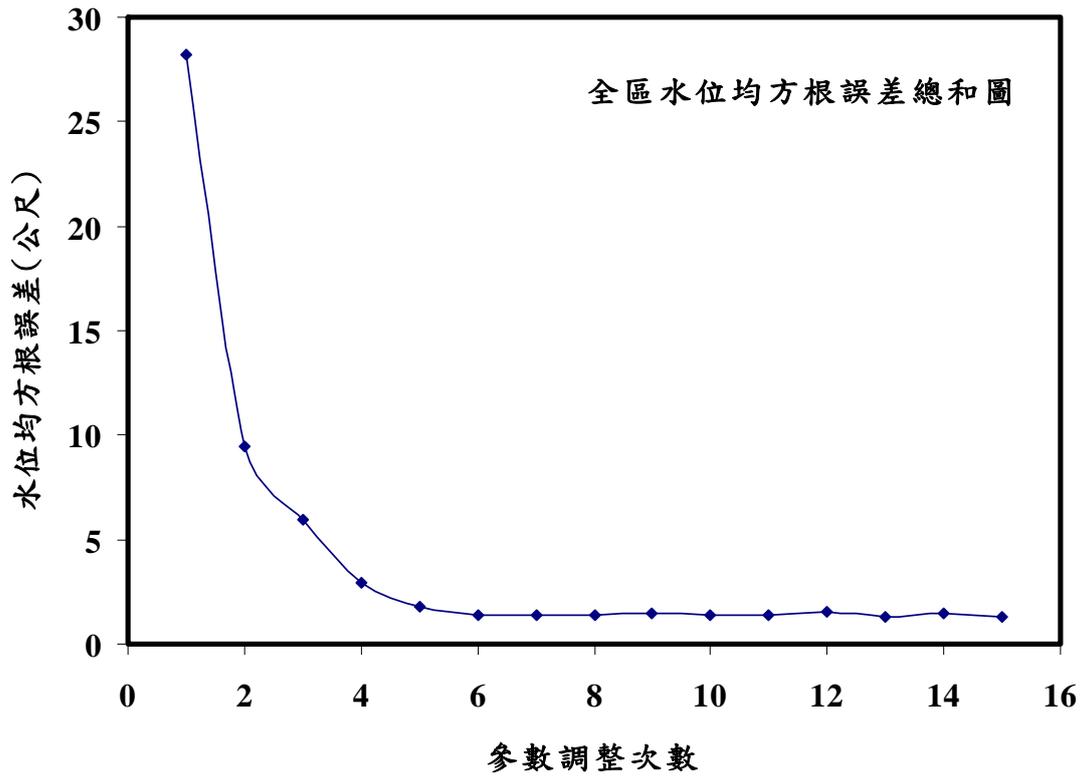


圖 5.3-2 全區水位均方根誤差圖(案例 III)

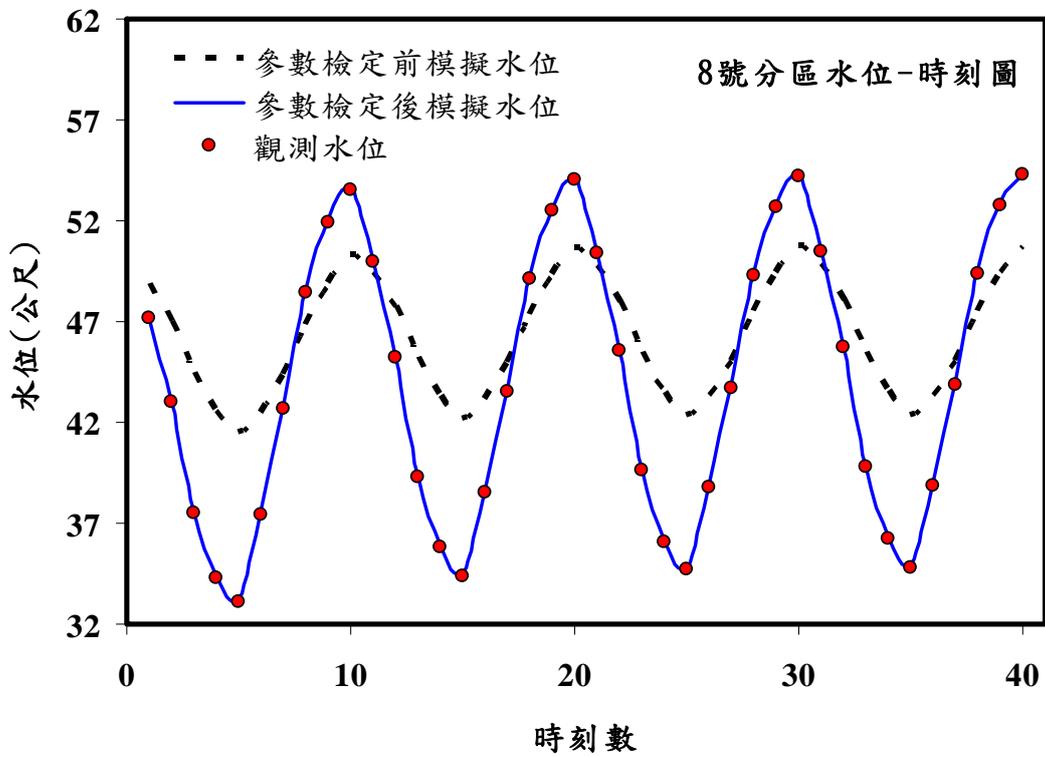


圖 5.3-3 8號區水位-時刻圖(案例 III)

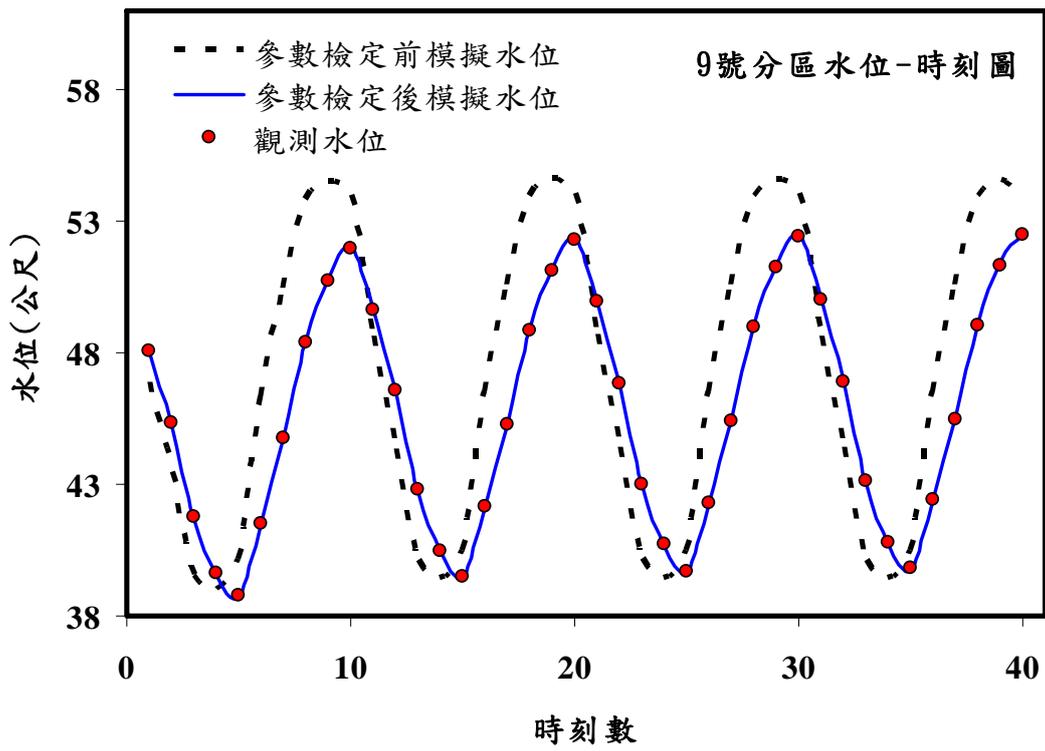


圖 5.3-4 9號分區水位-時刻圖(案例 III)

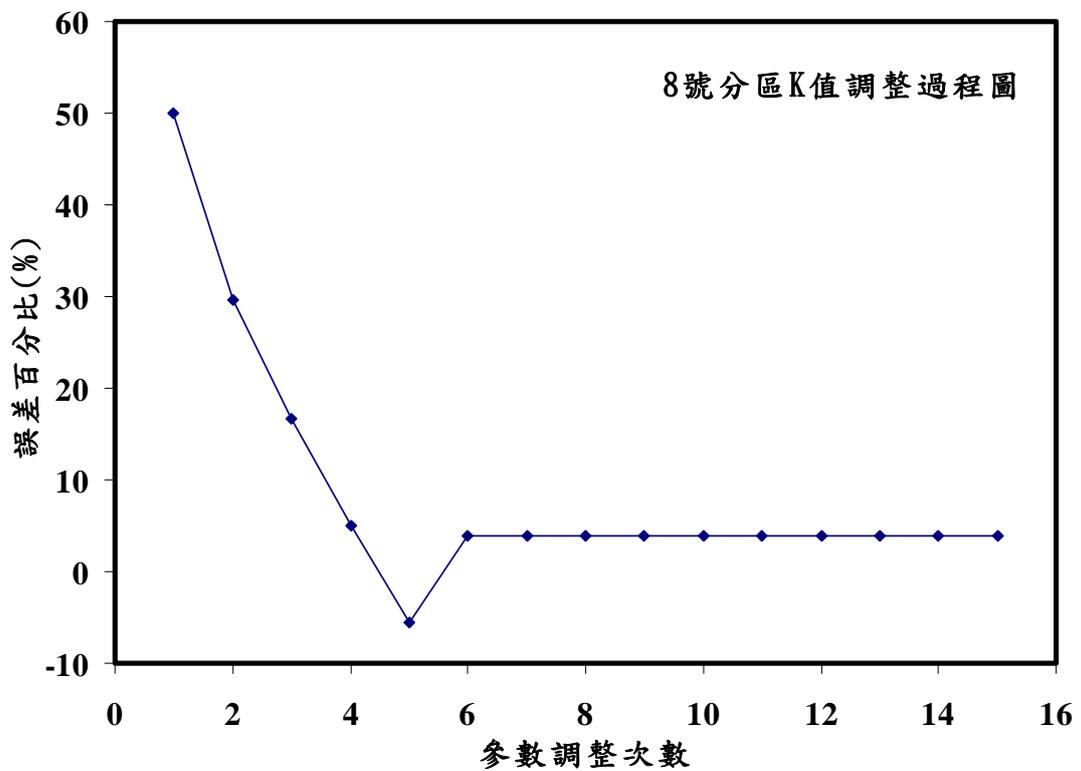


圖 5.3-5 8號分區 K 值調整過程圖(案例 III)

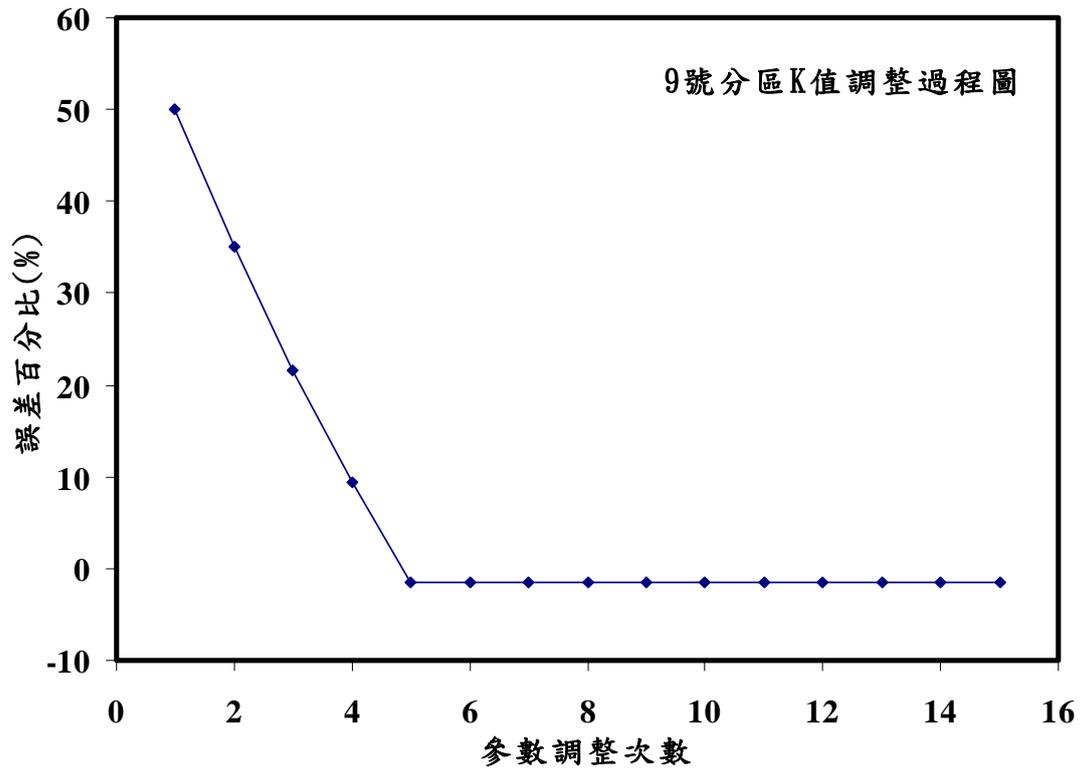


圖 5.3-6 9號分區 K 值調整過程圖(案例 III)

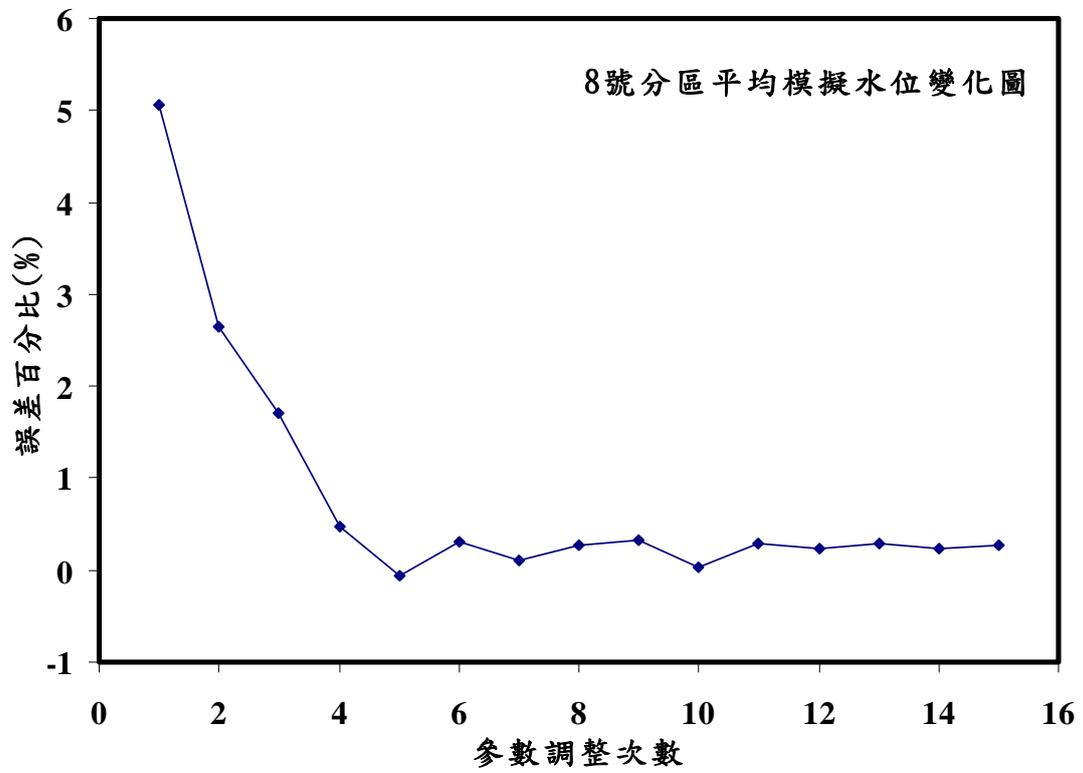


圖 5.3-7 8號分區平均模擬水位圖(案例 III)

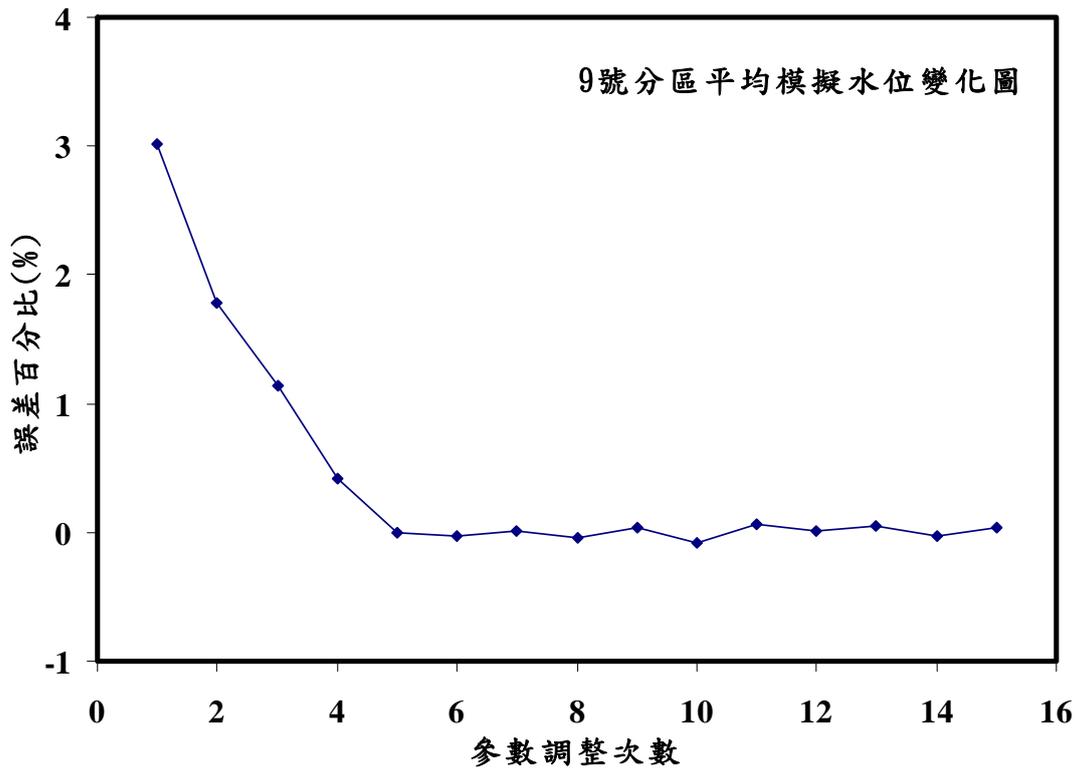


圖 5.3-8 9號分區平均模擬水位圖(案例 III)

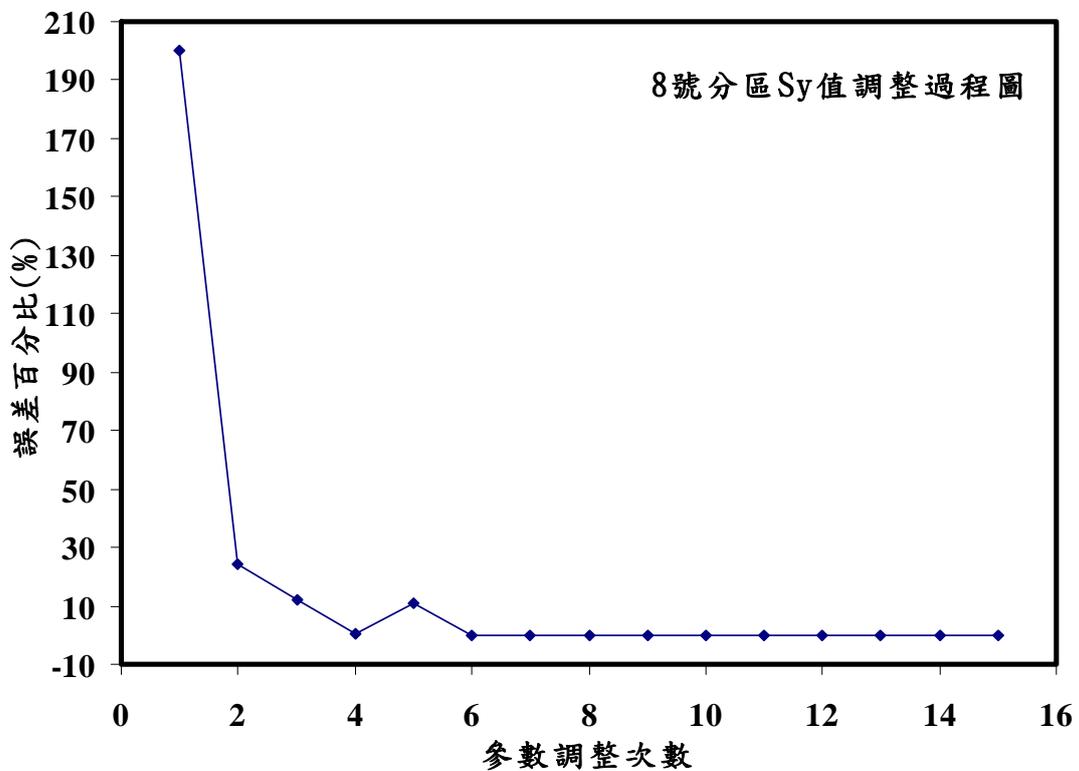


圖 5.3-9 8號分區 Sy 值調整過程圖(案例 III)

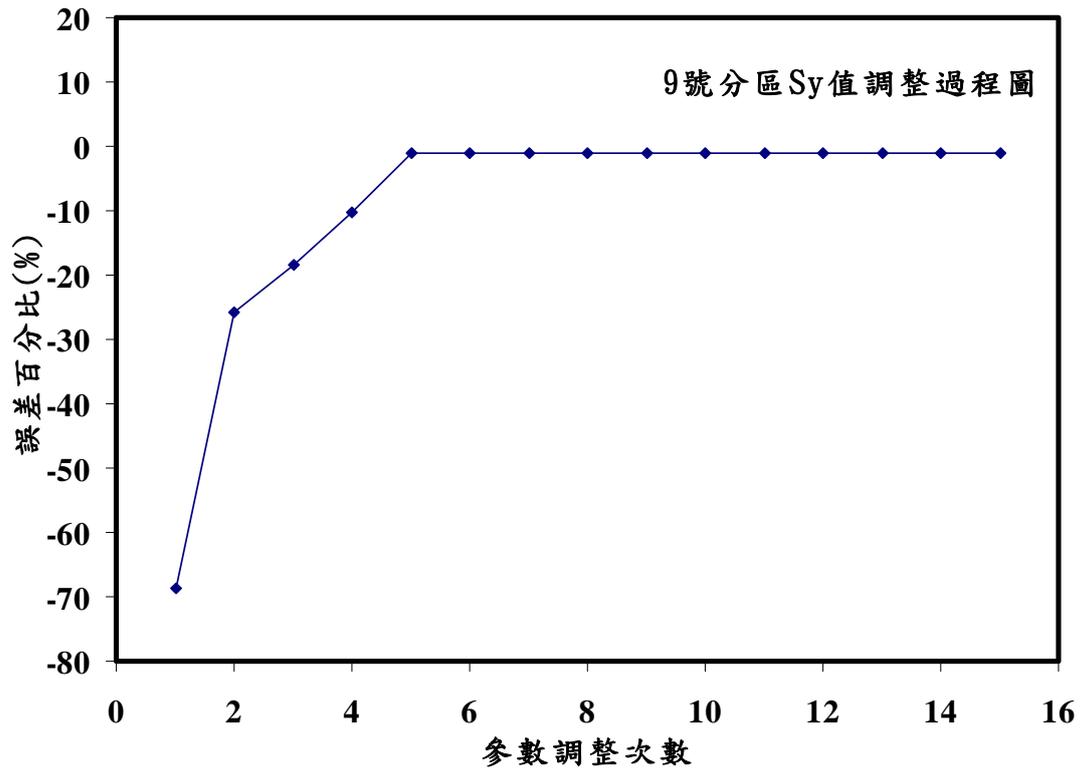


圖 5.3-10 9號分區 Sy 值調整過程圖(案例 III)

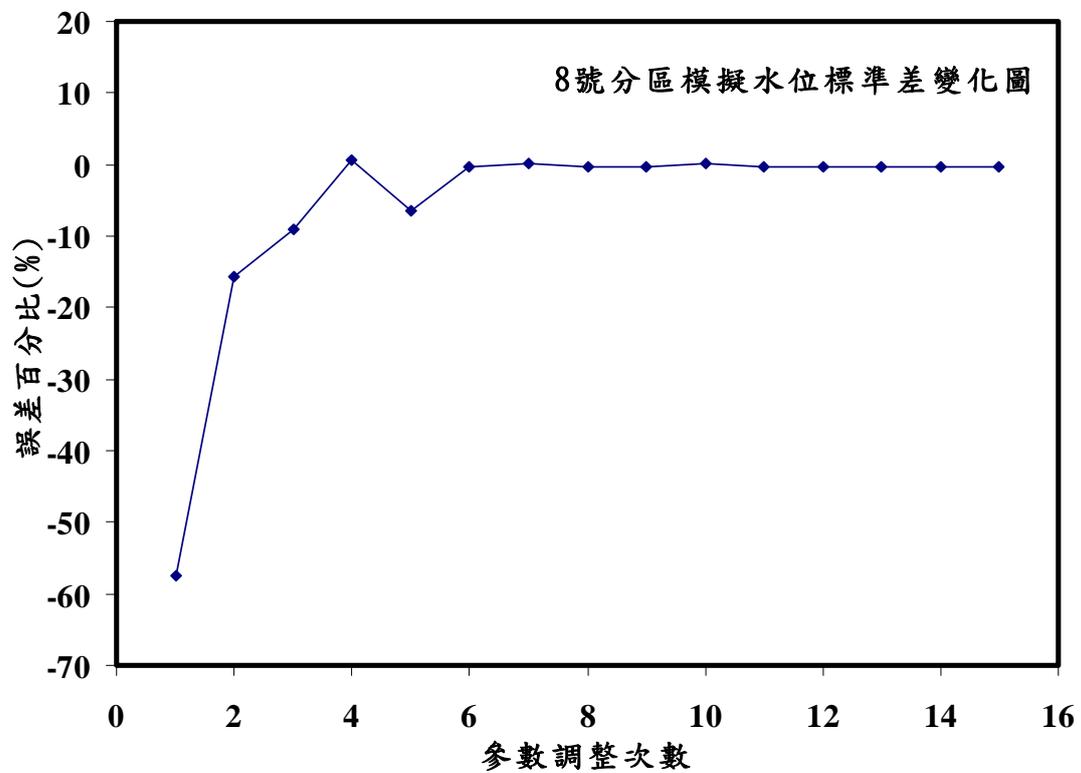


圖 5.3-11 8號分區模擬水位標準差圖(案例 III)

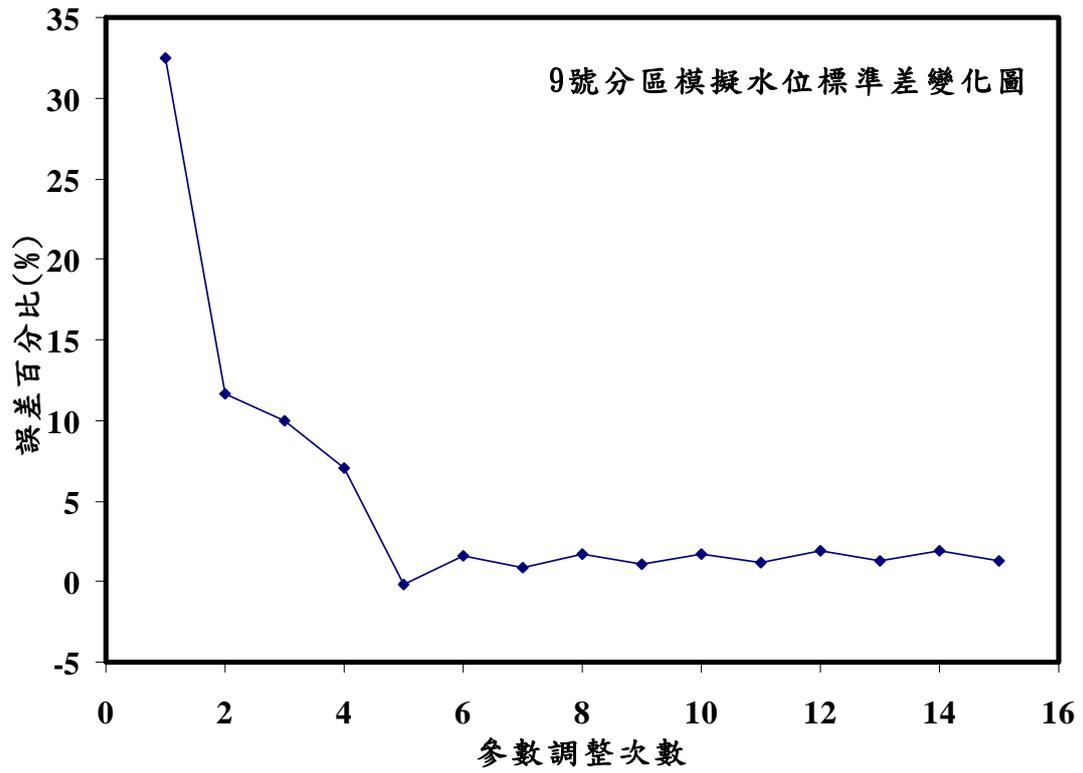


圖 5.3-12 9 號分區模擬水位標準差圖(案例 III)



## ● 案例 IV

### 案例說明：

本案例用以驗證同時參數檢定  $S_y$  值及  $K$  值之相關規則之正確性，與案例 III 相比模擬區域較大且分區較多，以測試本系統應用於分區結構較複雜之區域是否仍可完成參數檢定。

本案例為 4000 公尺見方之模擬區域，每個網格之長與寬皆為 200 公尺，共計 400 個(20x20)正方形網格，含水層為非受壓水層(Unconfined aquifer)。

在邊界條件設定方面，左方及右方設定為不透水邊界，上方及下方設定為定水頭邊界且水位高設定在 50 公尺；在分區設定方面，本案例總共分為 36 個分區，每個分區皆為 9 個網格，如圖 5.3-13 所示。在模擬時間方面，本案例為暫態模擬，總共模擬 42 個時刻，每個時刻為 5 天，總計 210 天。

在參數設定方面，整體模擬區域初始水位高皆設定為 50 公尺， $K$  值及  $S_y$  值之設定如表 5.3-4 所示， $K$  值及  $S_y$  值皆設定初始值，待完成參數檢定後再與目標值  $K$  及目標值  $S_y$  做比較。

本案例之抽水位置配置為每個網格皆抽水，圖 5.3-14 所示為單一網格之抽水量，全區各網格之抽水量相同。

本案例所設定之容許誤差值分為三種，分別為相鄰定水頭邊界之分區設定為 0.3 公尺；相鄰不透水邊界之分區設定為 0.4 公尺；不與邊界相鄰之分區設定為 0.5 公尺。

定水頭邊界(水位高50m)					
1號分區	2號分區	3號分區	4號分區	5號分區	6號分區
7號分區	8號分區	9號分區	10號分區	11號分區	12號分區
13號分區	14號分區	15號分區	16號分區	17號分區	18號分區
19號分區	20號分區	21號分區	22號分區	23號分區	24號分區
25號分區	26號分區	27號分區	28號分區	29號分區	30號分區
31號分區	32號分區	33號分區	34號分區	35號分區	36號分區
定水頭邊界(水位高50m)					

不透水邊界

圖 5.3-13 分區與邊界配置圖(案例 IV)

表 5.3-4 參數設定表(案例 IV)

	目標值 K(m/day)	目標值 $S_y$	初始值 K(m/day)	初始值 $S_y$
1 號分區	2	0.22	100	0.5
2 號分區	40	0.3	100	0.5
3 號分區	3	0.3	100	0.5
4 號分區	15	0.2	100	0.5
5 號分區	5	0.19	100	0.5
6 號分區	20	0.29	100	0.5
7 號分區	14	0.32	100	0.5
8 號分區	4	0.2	100	0.5
9 號分區	5	0.29	100	0.5
10 號分區	35	0.31	100	0.5
11 號分區	80	0.25	100	0.5
12 號分區	23	0.28	100	0.5
13 號分區	5	0.22	100	0.5
14 號分區	42	0.25	100	0.5
15 號分區	15	0.31	100	0.5
16 號分區	7	0.21	100	0.5
17 號分區	1	0.08	100	0.5
18 號分區	30	0.29	100	0.5
19 號分區	39	0.21	100	0.5
20 號分區	1	0.08	100	0.5
21 號分區	3	0.23	100	0.5
22 號分區	38	0.22	100	0.5
23 號分區	26	0.26	100	0.5
24 號分區	18	0.27	100	0.5
25 號分區	2	0.25	100	0.5
26 號分區	38	0.27	100	0.5
27 號分區	5	0.24	100	0.5
28 號分區	85	0.27	100	0.5
29 號分區	17	0.25	100	0.5
30 號分區	42	0.25	100	0.5
31 號分區	15	0.23	100	0.5
32 號分區	5	0.21	100	0.5
33 號分區	19	0.24	100	0.5
34 號分區	39	0.28	100	0.5
35 號分區	18	0.28	100	0.5
36 號分區	37	0.24	100	0.5

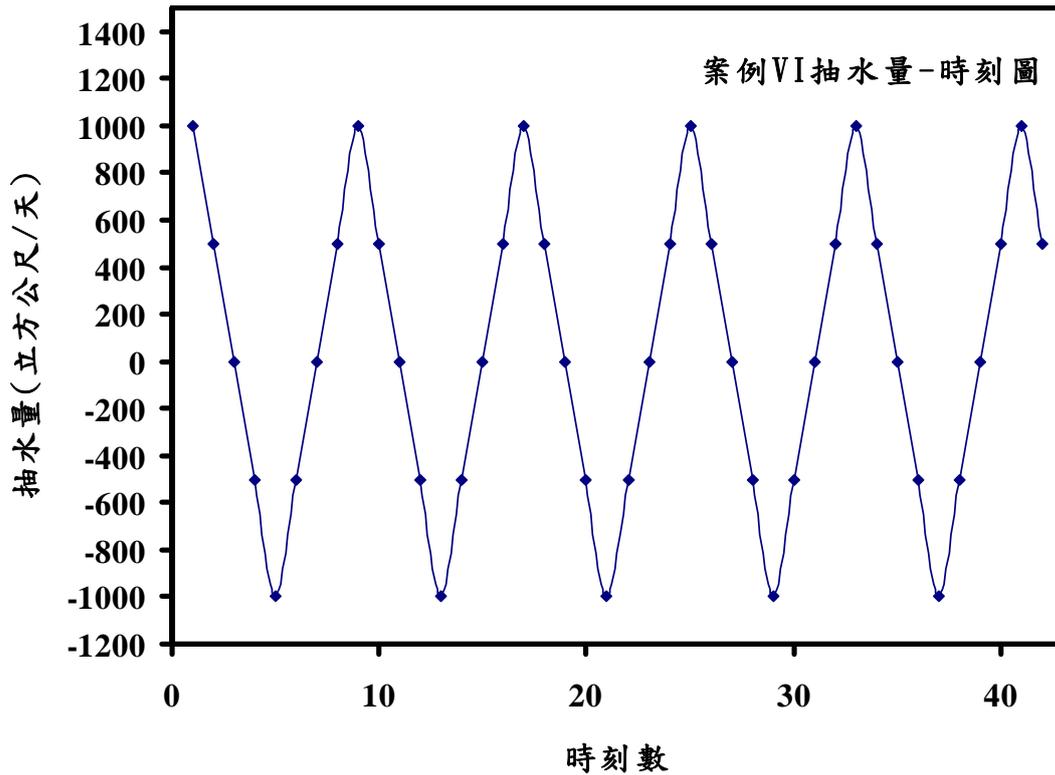


圖 5.3-14 抽水量-時刻圖(案例 IV)

**參數檢定結果：**

表 5.3-5 及表 5.3-6 為完成參數檢定後之 K 值及  $S_y$  值結果表，由表所示，各分區經過參數檢定後，各區之 K 值及  $S_y$  值皆能接近目標值，此亦驗證了本系統於分區較為繁雜的情況下仍能完成雙參數檢定。圖 5.3-15 為參數檢定結束後之各區水位均方根誤差圖，圖 5.3-16 為全區水位均方根誤差總和圖，可看出各區及全區之水位均方根誤差皆隨著 K 值及  $S_y$  值逐步調整而下降，參數檢定前全區水位均方根誤差為 69.21 公尺，參數檢定後全區水位均方根誤差為 8.84 公尺，而各區之水位均方根誤差值皆在 0.5 公尺以下。

圖 5.3-17 及圖 5.3-18 分別為 4 號分區及 5 號分區之水位-時刻圖，由圖所示參數檢定前之 4 號分區及 5 號分區各時刻模擬水位觀測水位皆明顯分離，兩者最大水位差值分別可達 4.44 公尺及 5.16 公尺，

而參數檢定後之模擬水位與觀測之水位幾乎重疊，經計算兩者最大水位差值分別為 0.39 公尺及 0.56 公尺，由此可看出檢定後水位較檢定前改善許多。

圖 5.3-19 為 4 號分區 K 值調整過程圖，依據「水力傳導係數 (Hydraulic Conductivity)調整規則」，若模擬水位平均值大於觀測水位平均值，且淨流通量為正，則調小 K 值，反之則調大 K 值。圖 5.3-20 為 4 號分區平均模擬水位變化圖，圖 5.3-21 為 4 號分區水位均方根誤差圖，圖中紅線為容許誤差值 0.3 公尺。由圖 5.3-19 所示，4 號分區在第九次停止調整 K 值，因為在第九次調整參數時 4 號分區水位均方根誤差小於設定之誤差容忍值 0.3，而在第十次調整參數時水位均方根誤差又超過 0.3(圖 5.3-23)，所以再次調整 K 值，且依據圖 5.3-20 所示，平均模擬水位大於平均觀測水位，加上經計算淨流通量為負，故在第十次調整參數時為調小 K 值，在第十一次參數調整時，4 號分區水位均方根誤差又小於所設定之容許誤差值 0.3，故再次停止調整參數。

除了參數調整影響水位外，相鄰分區水位也易互相影響，依據圖 5.3-19 及圖 5.3-20 所示，在第 8 次調整參數時 4 號分區調小 K 值，且淨流通量為負，故水位在第九次升高，而在第 9 次調整參數時 4 號分區未調整 K 值，但在第 10 次水位卻降低，是因為相鄰分區之影響，即為 4 號分區淨流通量為負，水為流出 4 號分區之情況，故水位降低。

圖 5.3-22 及圖 5.3-23 為 4 號分區及 5 號分區之  $S_y$  值調整過程圖，由此二圖所示，此兩區在參數檢定後之  $S_y$  值較檢定前為小，因此土體出水能力變小意即土壤之內部蓄水能力變差，故外在擾動(如抽捕水)對於水位之影響變大，因此水位變化在參數檢定後較檢定前劇烈，如圖 5.3-17 及圖 5.3-18 所示。

依據「比出水量(Specific Yield)調整規則」，當模擬水位標準差大於觀測水位標準差時則調大  $S_y$  值，相反則調小  $S_y$  值。圖 5.3-27 及圖 5.3-28 分別為 4 號分區及 5 號分區之模擬水位標準差變化圖，如圖 5.3-27 所示，4 號分區在第四次檢定參數後，模擬水位標準差較觀測水位標準差大，所以第五次調大  $S_y$  值。在第六次檢定時，依據「比出水量(Specific Yield)調整規則」，應調大  $S_y$  值，但由於檢定後之模擬水位標準差變大而非變小，依據「各分區參數調整合理性檢測規則」，在第七次調整  $S_y$  值時回復至第六次檢定時的  $S_y$  值。而直至完成參數檢定前，4 號分區不斷發動「各分區參數調整合理性檢測規則」，所以  $S$  值在之後皆未調整直至完成參數檢定。



表 5.3-5 參數 K 結果表(案例 IV)

	目標值 K(m/day)	初始值 K(m/day)	參數檢定後 K 值(m/day)	檢定後 K 值誤 差百分比(%)
1 號分區	2	100	3.56	78
2 號分區	40	100	59.05	47.625
3 號分區	3	100	3.95	31.66667
4 號分區	15	100	19.85	32.33333
5 號分區	5	100	6.69	33.8
6 號分區	20	100	34.99	74.95
7 號分區	14	100	34.99	149.9286
8 號分區	4	100	10.2	155
9 號分區	5	100	16.74	234.8
10 號分區	35	100	90	157.1429
11 號分區	80	100	90	12.5
12 號分區	23	100	38.88	69.04348
13 號分區	5	100	14	180
14 號分區	42	100	81	92.85714
15 號分區	15	100	38.88	159.2
16 號分區	7	100	14	100
17 號分區	1	100	1.56	56
18 號分區	30	100	90	200
19 號分區	39	100	65.61	68.23077
20 號分區	1	100	1.56	56
21 號分區	3	100	15.55	418.3333
22 號分區	38	100	81	113.1579
23 號分區	26	100	34.99	34.57692
24 號分區	18	100	15.55	-13.6111
25 號分區	2	100	12.6	530
26 號分區	38	100	90	136.8421
27 號分區	5	100	15.55	211
28 號分區	85	100	90	5.882353
29 號分區	17	100	34.99	105.8235
30 號分區	42	100	81	92.85714
31 號分區	15	100	20.66	37.73333
32 號分區	5	100	7.44	48.8
33 號分區	19	100	25.51	34.26316
34 號分區	39	100	59.05	51.41026
35 號分區	18	100	34.99	94.38889
36 號分區	37	100	43.05	16.35135

表 5.3-6 參數  $S_y$  結果表(案例 IV)

	目標值 $S_y$	初始值 $S_y$	參數檢定後 $S_y$ 值	檢定後 $S_y$ 值誤差百分 比
1 號分區	0.22	0.5	0.232	5.454545
2 號分區	0.3	0.5	0.286	-4.66667
3 號分區	0.3	0.5	0.276	-8
4 號分區	0.2	0.5	0.224	12
5 號分區	0.19	0.5	0.184	-3.15789
6 號分區	0.29	0.5	0.272	-6.2069
7 號分區	0.32	0.5	0.333	4.0625
8 號分區	0.2	0.5	0.202	1
9 號分區	0.29	0.5	0.336	15.86207
10 號分區	0.31	0.5	0.292	-5.80645
11 號分區	0.25	0.5	0.259	3.6
12 號分區	0.28	0.5	0.302	7.857143
13 號分區	0.22	0.5	0.224	1.818182
14 號分區	0.25	0.5	0.262	4.8
15 號分區	0.31	0.5	0.302	-2.58065
16 號分區	0.21	0.5	0.224	6.666667
17 號分區	0.08	0.5	0.086	7.5
18 號分區	0.29	0.5	0.292	0.689655
19 號分區	0.21	0.5	0.216	2.857143
20 號分區	0.08	0.5	0.086	7.5
21 號分區	0.23	0.5	0.248	7.826087
22 號分區	0.22	0.5	0.262	19.09091
23 號分區	0.26	0.5	0.272	4.615385
24 號分區	0.27	0.5	0.248	-8.14815
25 號分區	0.25	0.5	0.246	-1.6
26 號分區	0.27	0.5	0.292	8.148148
27 號分區	0.24	0.5	0.248	3.333333
28 號分區	0.27	0.5	0.259	-4.07407
29 號分區	0.25	0.5	0.272	8.8
30 號分區	0.25	0.5	0.262	4.8
31 號分區	0.23	0.5	0.224	-2.6087
32 號分區	0.21	0.5	0.22	4.761905
33 號分區	0.24	0.5	0.246	2.5
34 號分區	0.28	0.5	0.238	-15
35 號分區	0.28	0.5	0.333	18.92857
36 號分區	0.24	0.5	0.238	-0.83333

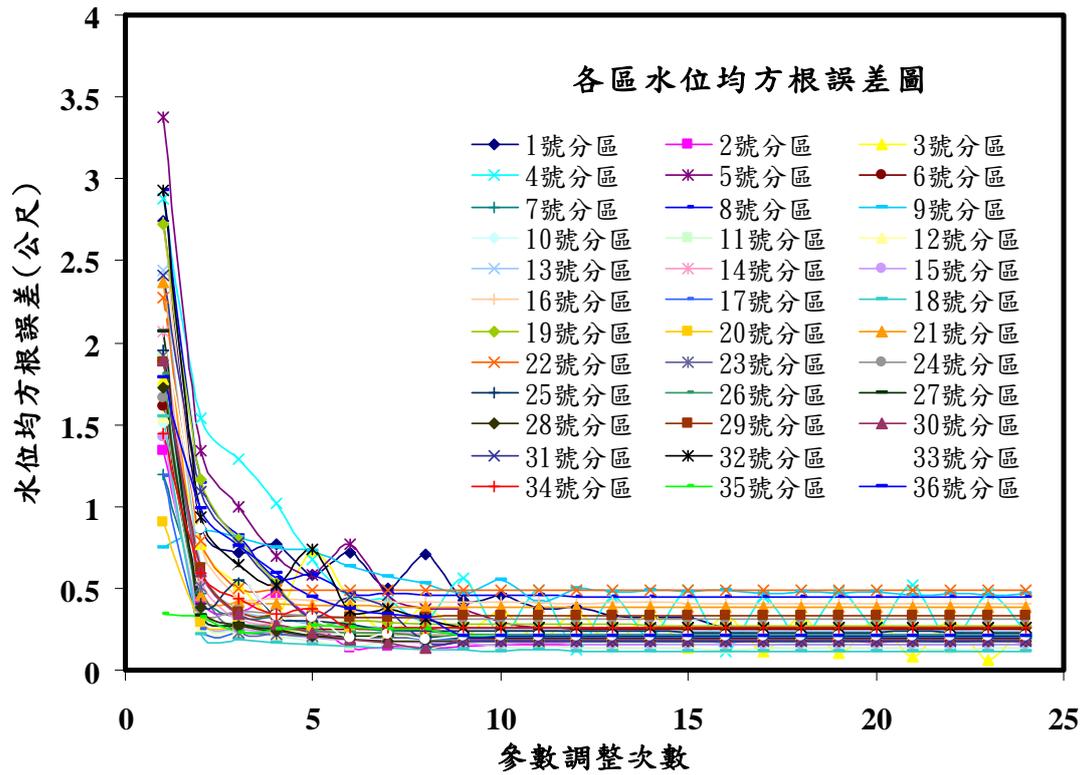


圖 5.3-15 各區水位均方根誤差圖(案例 IV)

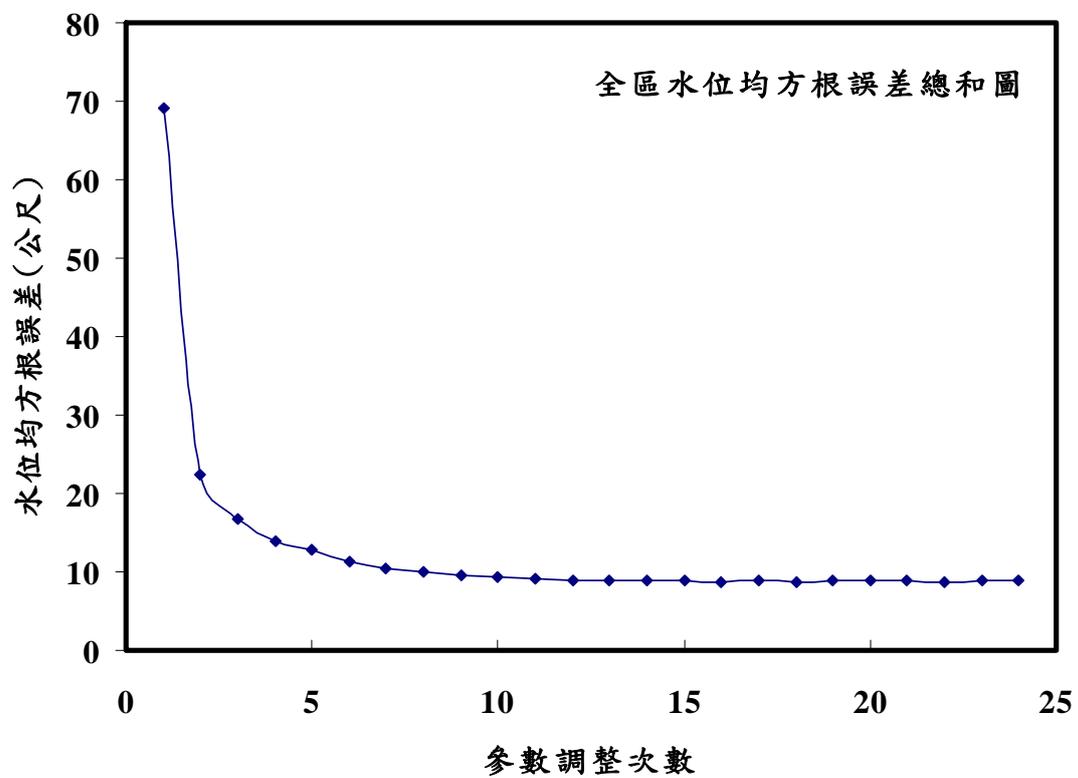


圖 5.3-16 全區水位均方根誤差圖(案例 IV)

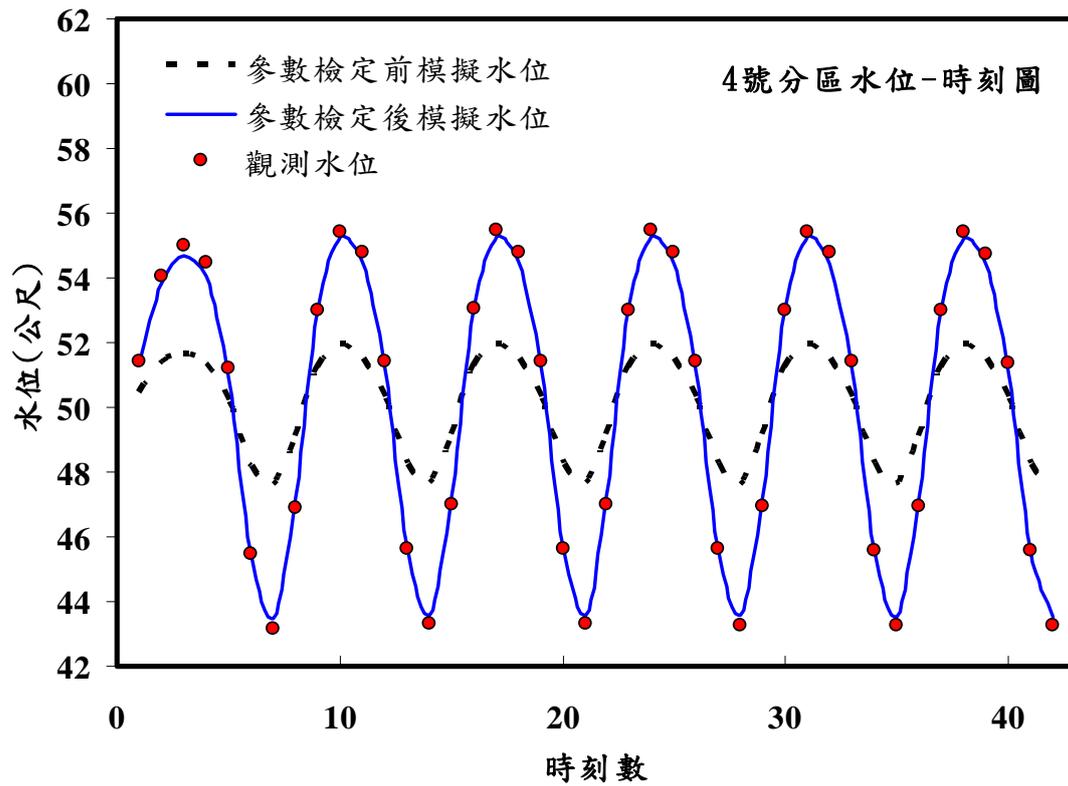


圖 5.3-17 4 號分區水位-時刻圖(案例 IV)

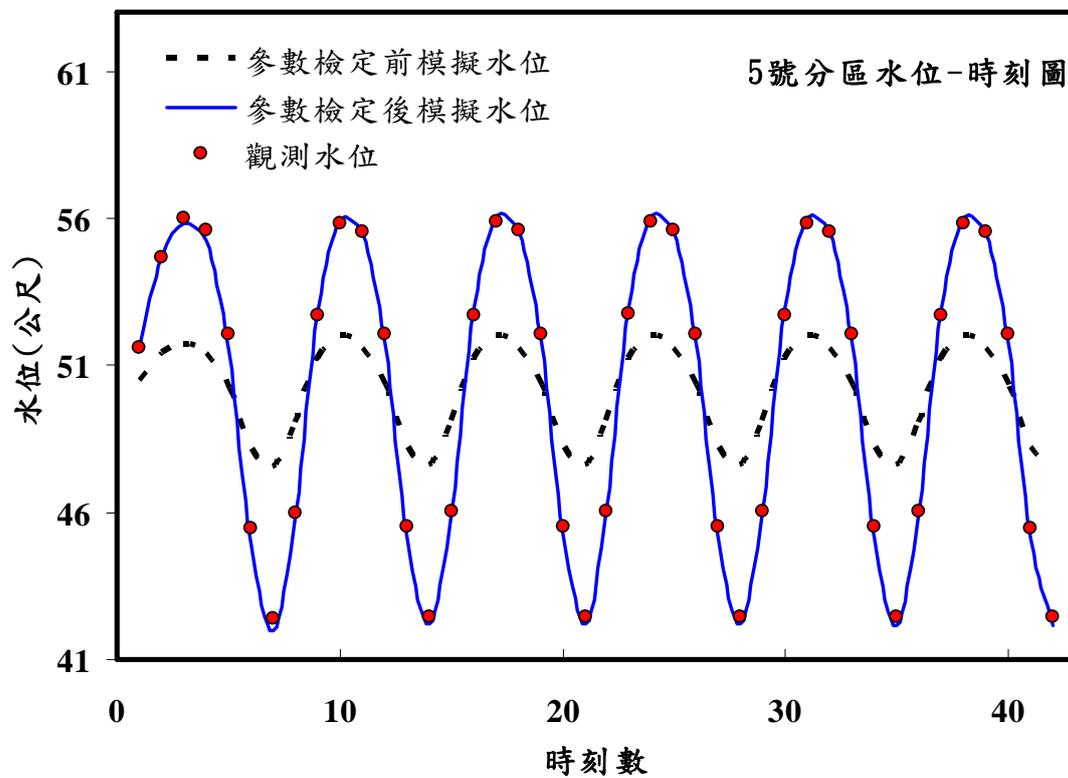


圖 5.3-18 5 號分區水位-時刻圖(案例 IV)

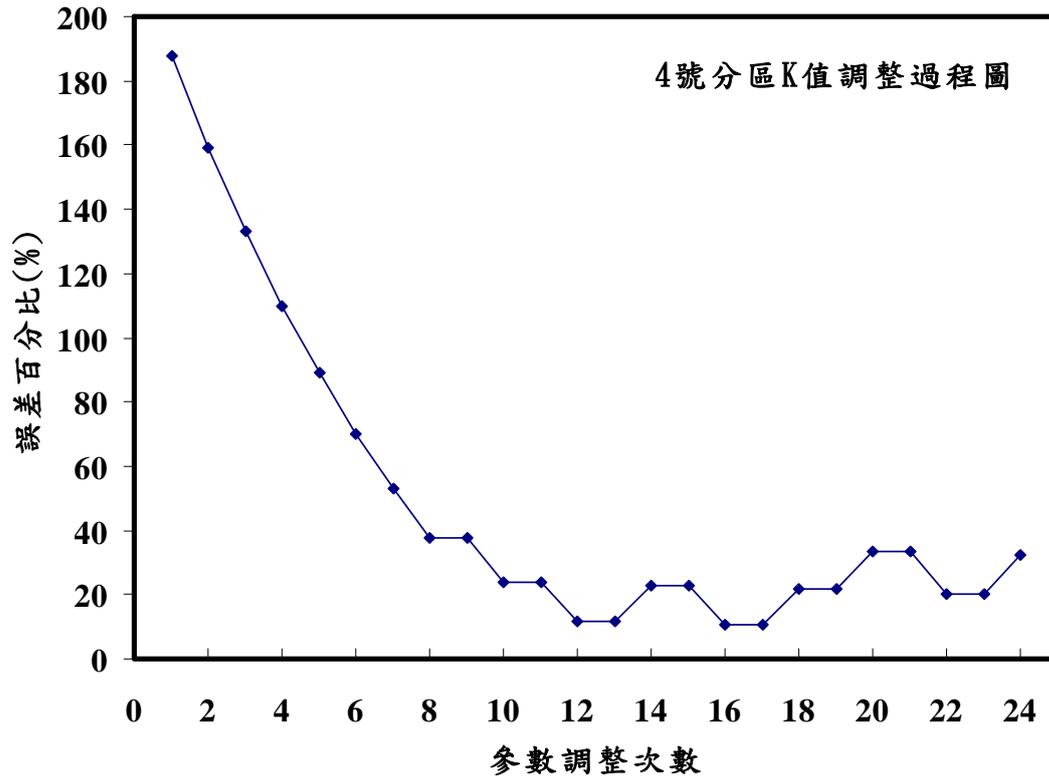


圖 5.3-19 4號分區 K 值調整過程圖(案例 IV)

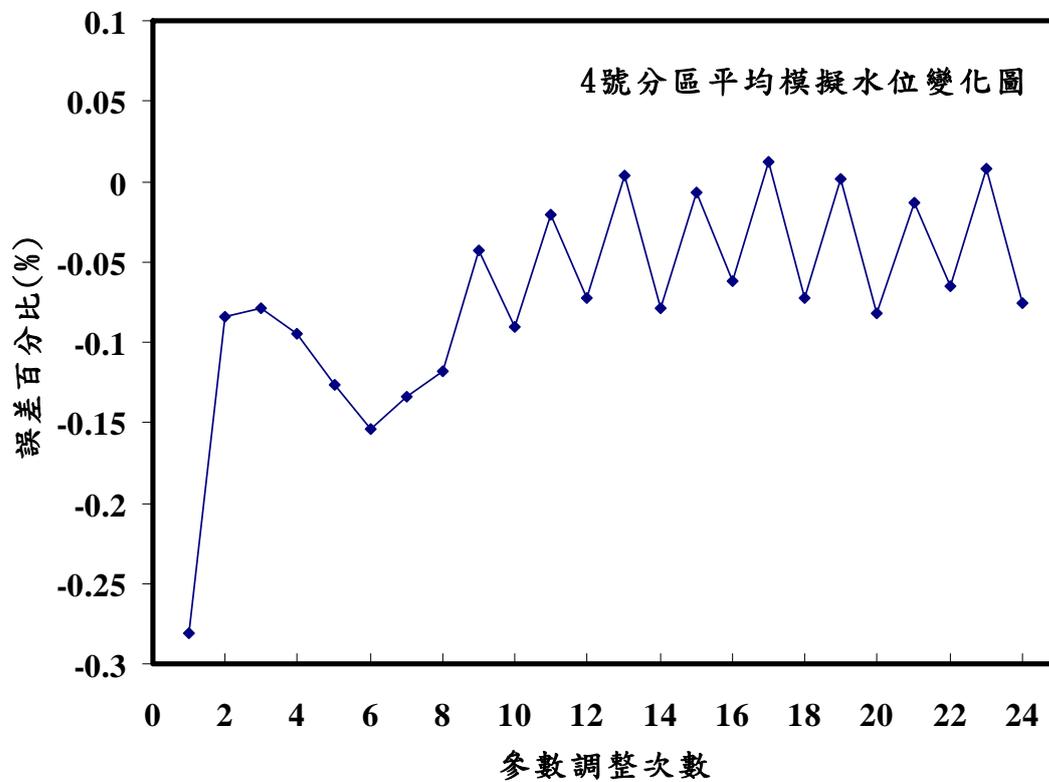


圖 5.3-20 4號分區平均模擬水位變化圖(案例 IV)

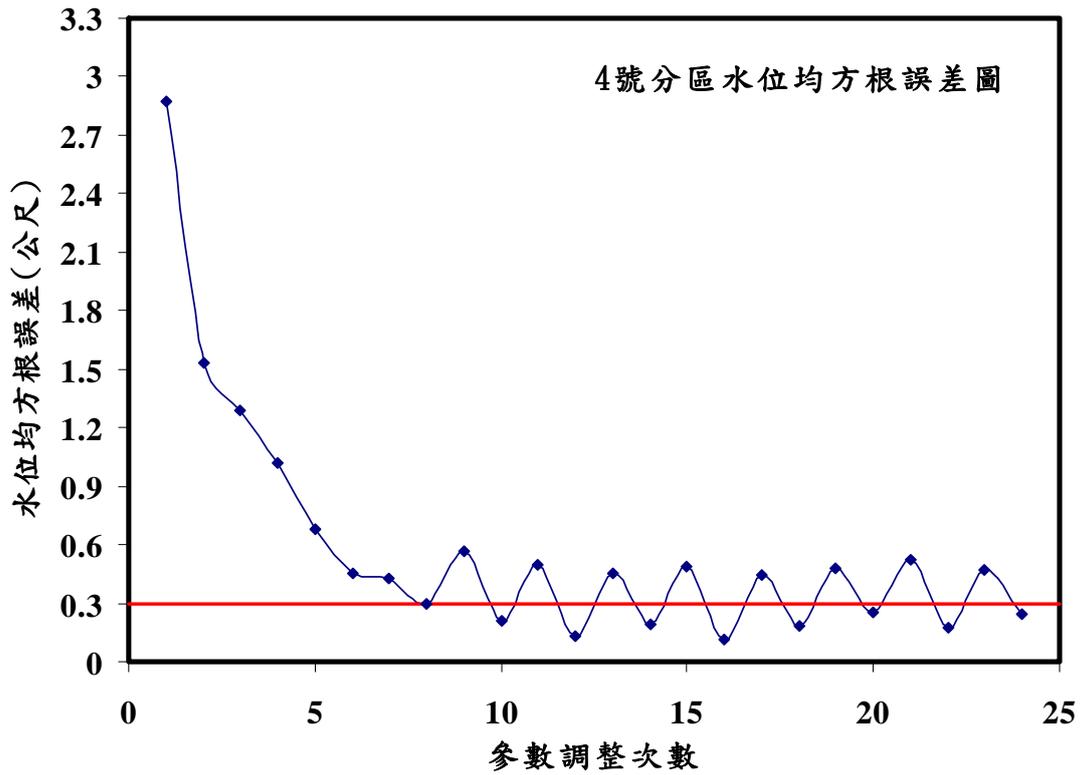


圖 5.3-21 4 號分區水位均方根誤差圖(案例 IV)

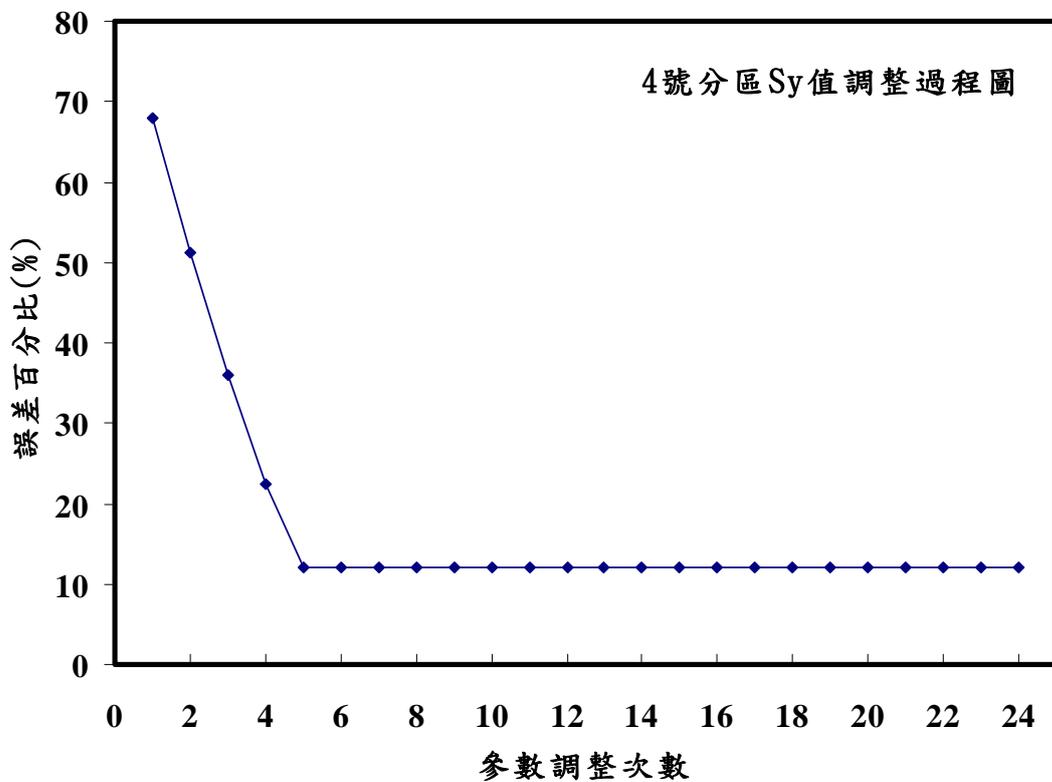


圖 5.3-22 4 號分區 Sy 值調整過程圖(案例 IV)

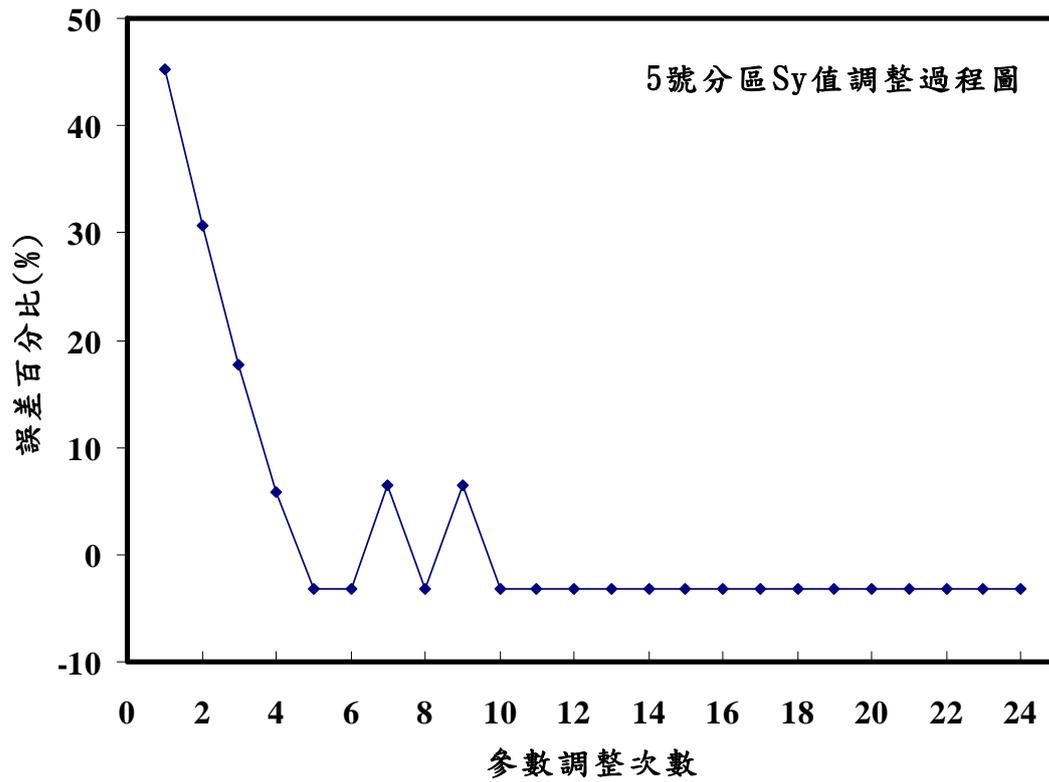


圖 5.3-23 5 號分區 Sy 值調整過程圖(案例 IV)

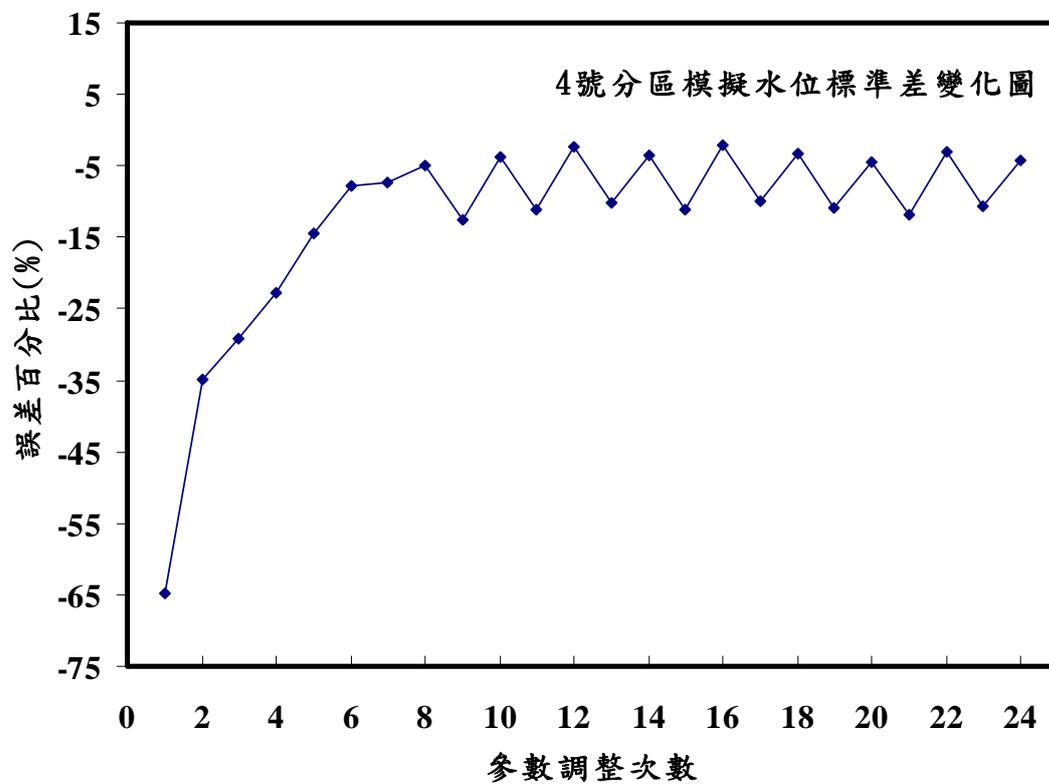


圖 5.3-24 4 號分區模擬水位標準差變化圖(案例 IV)

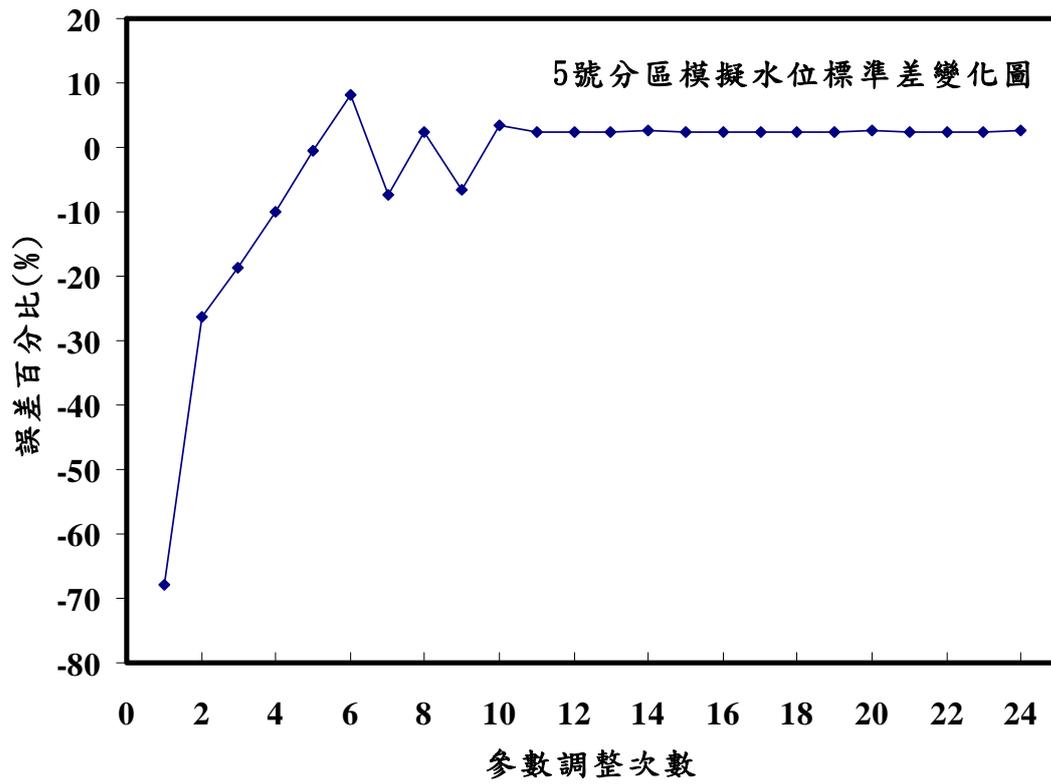


圖 5.3-25 5 號分區模擬水位標準差變化圖(案例 IV)



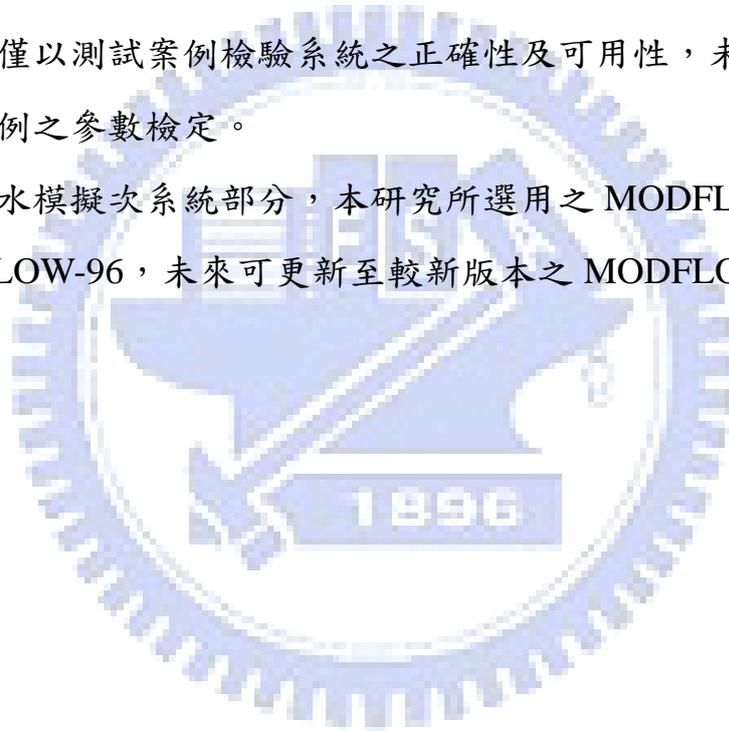
## 第六章 結論與建議

### 5.1 結論

1. 本研究結合專家系統及地下水模式 MODFLOW 發展智慧型地下水參數檢定系統，經過四種案例之測試均可完成參數之檢定，證實本系統之適用性及正確性。
2. 經由案例驗證顯示，本研究開發之智慧型地下水參數檢定系統具有以下特點：
  - 可累積參數檢定之經驗。
  - 參數檢定之過程與結果可以理解及解釋。
  - 不需先建立複雜的參數優選模式。
  - 可將誤差選擇性的平均分攤，避免誤差集中於某些分區。
3. 透過四種案例應用測試，由於比出水量(S 值)可變動區間較水力傳導係數(K 值)小，故參數檢定後比出水量較水力傳導係數更能接近目標值。
4. 四種案例應用測試結果顯示，此四案例檢定後模擬水位皆相較於檢定前模擬水位改善許多。

## 5.2 建議

1. 由於專家系統知識庫中之地下水參數檢定規則可持續累積，因此若遇到新問題時，可於知識庫擴充新規則以解決問題，故本系統未來只需擴充知識庫規則，並無需再重新建置系統，即可應用於更複雜的地下水系統之參數檢定。
2. 未來可於專家系統知識庫內之參數檢定規則中加入優選法概念，以提高本系統之效率，譬如可應用優選法於決定參數修正量之規則中。
3. 本研究僅以測試案例檢驗系統之正確性及可用性，未來可運用於實際案例之參數檢定。
4. 在地下水模擬次系統部分，本研究所選用之 MODFLOW 版本為 MODFLOW-96，未來可更新至較新版本之 MODFLOW。



## 參考文獻

1. K.W. Chau, "Intelligent manipulation of calibration parameters in numerical modeling", *Advances in Environmental Research*, 8, p. 467–476, 2004.
2. K.W. Chau, "Selection and calibration of numerical modeling in flow and water quality", *Environmental Modeling and Assessment*, 9, p. 169–178, 2004.
3. K.W. Chau, "A review on integration of artificial intelligence into water quality modeling", *Marine Pollution Bulletin*, 52, p. 726–733, 2006.
4. K.W. Chau, "A review on the integration of artificial intelligence into coastal modeling", *Journal of Environmental Management*, 80, p. 47–57, 2006.
5. Sang Min Kim, Brian L. Benham, Kevin M. Brannan, Rebecca W. Zeckoski, John Doherty, 2007, , Comparison of hydrologic calibration of HSPF using automatic and manual methods, *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 43, W01402, doi:10.1029/2006WR004883.
6. Chau, K.W., 2003. Manipulation of numerical coastal flow and water quality models. *Environmental Modelling and Software* 18 (2), 99 – 108.
7. Chau, K.W., Albermani, F., 2002. Expert system application on preliminary design of liquid retaining structures. *Expert Systems with Applications* 22 (2), 169 – 178.
8. Chau, K.W., Albermani, F., 2003. Knowledge-based system on

optimum design of liquid retaining structures with genetic algorithms. *Journal of Structural Engineering*, ASCE 129 (10), 1312 – 1321.

9. Chau, K.W., Chen, W., 2001. An example of expert system on numerical modelling system in coastal processes. *Advances in Engineering Software* 32 (9), 695 – 703.
10. Henrik Madsen, Geoffery Wilson, Hans Christian Ammentorp, 2002, Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall run-off models.
11. Abbott, M.B., 1991. *Hydroinformatics: Information Technology and the Aquatic Environment*. Avebury Technical, Aldershot
12. Madsen, H., 2003. Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives.
13. Madsen, H., 2000. Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *J. Hydrol.* 235, pp. 276–288.
14. Hill, M.C., 1992. A computer program (MODFLOWP) for estimating parameters of a transient, three-dimensional, ground-water flow model using nonlinear regression. US Geological Survey, Open File Report 91-484, pp. 3–4 and 15.

## 附錄 A MODFLOW 簡介

MODFLOW為美國地質調查局(U.S.G.S.)發展之程式。該程式可解二維及三維之地下水流問題，含水層之種類可為自由、受壓、半受壓含水層，依地質特性分類可為均質、非均質及等向性、非等向性含水層。MODFLOW 程式乃利用有限差分法(Block Centered Finite Difference Approach)解水流控制方程式，計算機數值求解方法乃採用兩種疊代技巧強制隱式法(SIP)及鬆弛疊代法(SSOR)。程式包括之重要單元有水井、區域性補注量、蒸發散、河川之滲流及定水頭邊界。以下就對MODFLOW程式發展作一介紹：

三維地下水流在孔隙介質中的運動行為可以下列之偏微分方程式來表示：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad [\text{附A.1}]$$

其中

$K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$ ：沿主軸  $X, Y, Z$  方向的透水係數 (Hydraulic Conductivity) ( $LT^{-1}$ )

$h$ ：管壓水頭(Potentiometric Head) (L)

$W$ ：單位體積的體積流率 (Volumetric Flux)，代表源匯項 (Sources/Sinks) ( $T^{-1}$ )

$S_s$ ：孔隙介質的比儲水量 (Specific Storage) ( $L^{-1}$ )

$t$ ：表時間 ( $T$ )

上述式 (附A.1) 若結合了含水層系統邊界情況、起始條件等資訊，可組成一地下水流系統的數學表示式。但由於其解析解難以求得，故必須用數值方法來作推導，MODFLOW以有限差分法求得其數值解。

若以有限差分方式來表達地下水流方程式，則必須利用連續性方程式 (所有進入及流出 cell 的流量必定等於在cell中儲蓄量的改變率)，且假設地下水流之密度( $\rho$ )為一定值。所以對於一個cell(i,j,k)來說，若考慮本身及其鄰近的六個含水層的cells((i-1,j,k),(i+1,j,k),(i,j-1,k),(i,j+1,k),(i,j,k-1),(i,j,k+1))。如圖附A.1所示：

假設在列 (row) 方向的 cell(j,j-1,k) 流進 cell(i,j,k) 的流量為：

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-1/2}} \quad [\text{附A.2}]$$

上式中：

$h_{i,j,k}$  及  $h_{i,j-1,k}$  分別代表在節點 (i,j,k);(i,j-1,k)水頭。

$q_{i,j-1/2,k}$  為通過介於cell(i,j,k)和(i,j-1,k) 間界面體積的流量 ( $L^3t^{-1}$ )。

$KR_{i,j-1/2,k}$  為在列 (row)方向介於節點 (i,j,k) 和 (i,j-1,k) 間的透水係數。

$\Delta c_i \Delta v_k$  為垂直於列 (row)方向的 cell 面的截面積。

$\Delta r_{j-1/2}$  為節點 (i,j,k) 和 (i,j-1,k) 間的距離。

所以同理可求得其餘的五個面流進 cell(i,j,k)的流量：

$$q_{i,j+1/2,k} = KR_{i,j+1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j+1/2}}$$

$$q_{i+1/2,j,k} = KR_{i+1/2,j,k} \Delta r_j \Delta v_k \frac{(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta c_{j+1/2}}$$

$$q_{i+1/2,j,k} = KR_{i-1/2,j,k} \Delta r_j \Delta v_k \frac{(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta c_{i-1/2}}$$

$$q_{i,j,k+1/2} = KR_{i,j,k+1/2} \Delta r_j \Delta c_i \frac{(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k})}{\Delta v_{k+1/2}}$$

$$q_{i,j,k-1/2} = KR_{i,j,k-1/2} \Delta r_j \Delta c_i \frac{(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k})}{\Delta v_{k+1/2}}$$

若  $CR = KR \times \frac{\Delta A}{L}$ ，則連續性方程式可表示為：

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-1/2,k} (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) + CR_{i,j+1/2,k} (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) + CC_{i-1/2,j,k} (h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) \\ & + CC_{i+1/2,j,k} (h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k-1/2} (h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k+1/2} (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \\ & = S_{s_{i,j,k}} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \end{aligned} \quad [\text{附 A.3}]$$

上式中：

$S_{s_{i,j,k}}$ : cell(i,j,k) 的比儲水量

$\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$ : cell(i,j,k) 的體積

現在若在多加以考慮源、匯 (Sources、Sinks)，則連續性方程式變為：

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-1/2,k} (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) + CR_{i,j+1/2,k} (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) + CC_{i-1/2,j,k} (h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) \\ & + CC_{i+1/2,j,k} (h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k-1/2} (h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k+1/2} (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \\ & + QS_{i,j,k} = S_{s_{i,j,k}} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \end{aligned} \quad [\text{附 A.4}]$$

一般而言， $QS_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^N P_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + \sum_1^N q_{i,j,k,n}$

此處：  $a_{i,j,k,n}$ ：第  $n$  個外在的源流進 cell(i,j,k) 的流量。

$$P_{i,j,k,n} (L^2 T^{-1}), q_{i,j,k,n} (L^3 T^{-1}) \text{ 均等於常數。}$$

MODFLOW中所採用的為後向差分(Backward Difference)，所以對於 cell(i,j,k)來說，若以  $t_m$  和  $t_{m-1}$  之間來代表  $\Delta t$ ，則：

$$\left( \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \right) = \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \quad [\text{附A.5}]$$

將方程式 (附C.5) 代入 (附C.4) 中，則可得：

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-1/2,k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+1/2,k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i-1/2,j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) \\ & + CC_{i+1/2,j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k-1/2} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+1/2} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) \\ & + P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = S_{s_{i,j,k}} \frac{(h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1})}{t_m - t_{m-1}} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \end{aligned}$$

[附A.6]

所以將有含  $h_{i,j,k}^m$  的項全移至左邊，而含  $h_{i,j,k}^{m-1}$  的項移至右邊，則可得：

$$\begin{aligned} & CV_{i,j,k-1/2} h_{i,j,k-1}^m + CR_{i,j-1/2,k} h_{i,j-1,k}^m + CC_{i-1/2,j,k} h_{i-1,j,k}^m + (-CR_{i,j-1/2,k} - CC_{i-1/2,j,k} \\ & - CR_{i,j+1/2,k} - CC_{i+1/2,j,k} - CV_{i,j,k-1/2} - CV_{i,j,k+1/2} + HCOF_{i,j,k}) h_{i,j,k}^m + CV_{i,j,k+1/2} h_{i,j,k+1}^m \\ & + CR_{i,j+1/2,k} h_{i,j+1,k}^m + CC_{i+1/2,j,k} h_{i+1,j,k}^m = RHS_{i,j,k} \end{aligned}$$

[附A.7]

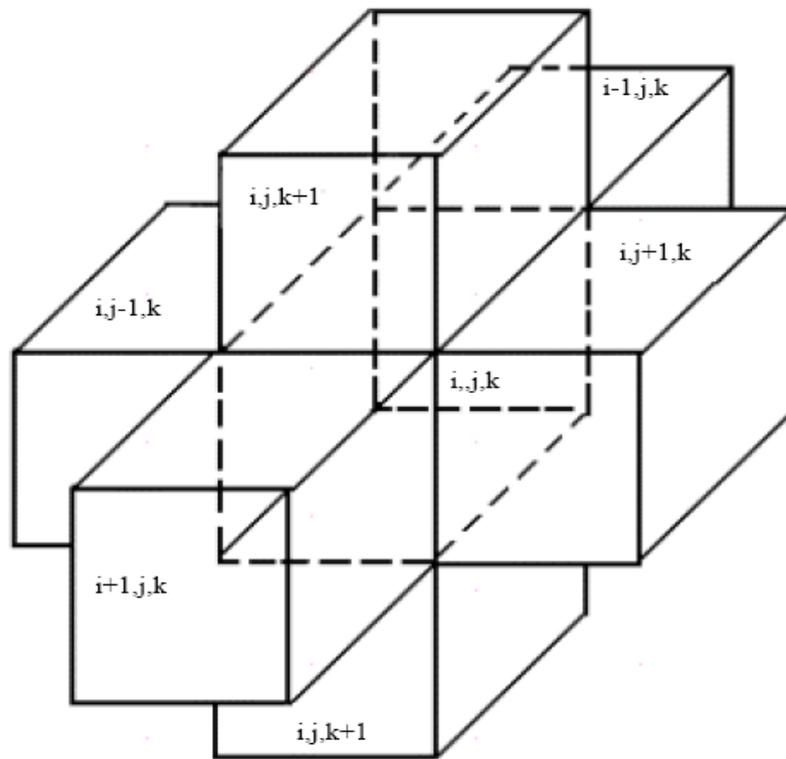
其中：

$$HCOF_{i,j,k} = P_{i,j,k} - S_{s_{i,j,k}} l (t_m - t_{m-1})$$

$$RHS_{i,j,k} = -Q_{i,j,k} - S_{s_{i,j,k}} h_{i,j,k}^{m-1} l (t_m - t_{m-1})$$

$$S_{s_{i,j,k}} = S_{s_{i,j,k}} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$$

而附A.7式即是MODFLOW程式所解之差分式。



圖附 A.1 cell(i,j-1,k)進入 cell 之地下水流



## 附錄 B 參數檢定完整規則展示

本附錄以CLIPS格式展示參數檢定完整規則，以下依據第四章的規則分類方式將規則分為六類：

### 1. 參數值合理性檢測規則

```
(defrule KS_Range;K:m/day
?obj<-(object(is-a groundwater)(Soil_Category ?a))
=>
(if (eq ?a 1);Gravel
then (send ?obj put-K_Max 2592.1)
      (send ?obj put-K_Min 25.92)
      (send ?obj put-S_Max 0.288)
      (send ?obj put-S_Min 0.192))
(if (eq ?a 2);Coarse Sand
then (send ?obj put-K_Max 518.4)
      (send ?obj put-K_Min 0.07776)
      (send ?obj put-S_Max 0.324)
      (send ?obj put-S_Min 0.216))
(if (eq ?a 3);Medium Sand
then (send ?obj put-K_Max 43.2)
      (send ?obj put-K_Min 0.07776)
      (send ?obj put-S_Max 0.336)
      (send ?obj put-S_Min 0.224))
(if (eq ?a 4);Fine Sand
then (send ?obj put-K_Max 17.28)
      (send ?obj put-K_Min 0.01728)
      (send ?obj put-S_Max 0.276)
      (send ?obj put-S_Min 0.184))
```

```

(if (eq ?a 5);Silt
then (send ?obj put-K_Max 1.728)
      (send ?obj put-K_Min 0.0000864)
      (send ?obj put-S_Max 0.096)
      (send ?obj put-S_Min 0.064))
)

```

## 2.各分區容許誤差值選定規則

```

(defrule CheckIfConvergent
?obj<-(object(is-a groundwater)(Head_RMSE ?a)(BC ?c)
(Error_Tolerance_0 ?d)(Error_Tolerance_1 ?e)(Error_Tolerance_2 ?f))
=>
(if (or (and (eq ?c 0) (< ?a ?d));不與邊界相鄰
      (and (eq ?c 1) (< ?a ?e));與不透水邊界相鄰
      (and (eq ?c 2) (< ?a ?f));與定水頭邊界相鄰
then (send ?obj put-Stop Y)
else (send ?obj put-Stop N)
)
)
)

```

## 3.水力傳導係數(Hydraulic Conductivity) 調整規則

```

(defrule K1
?obj<-(object(is-a groundwater)(Head_Obs_Average ?a)
(Head_Sim_Average ?b)(Flux_Zone_Average ?c)(Stop N))
=>
(if (and (> ?a ?b) (> ?c 0))
then (send ?obj put-Parameter K)
      (send ?obj put-Method multiply)
)
)

```

```

      (send ?obj put-Value_K bigger))
(if (and (< ?a ?b) (> ?c 0))
then (send ?obj put-Parameter K)
      (send ?obj put-Method multiply)
      (send ?obj put-Value_K smaller))
(if (and (> ?a ?b) (< ?c 0))
then (send ?obj put-Parameter K)
      (send ?obj put-Method multiply)
      (send ?obj put-Value_K smaller))
(if (and (< ?a ?b) (< ?c 0))
then (send ?obj put-Parameter K)
      (send ?obj put-Method multiply)
      (send ?obj put-Value_K bigger))
)

```

#### 4. 比出水量(Specific Yield) 調整規則

```

(defrule S1
?obj<-(object(is-a groundwater)(Head_Obs_StdDev ?a)
(Head_Sim_StdDev ?b)(Stop N))
=>
(if (> ?a ?b)
then (send ?obj put-Parameter S)
      (send ?obj put-Method multiply)
      (send ?obj put-Value_S smaller)
else (send ?obj put-Parameter S)
      (send ?obj put-Method multiply)
      (send ?obj put-Value_S bigger))
)

```

## 5.各分區參數調整合理性檢測規則

```
(defrule K2
?obj<-(object(is-a groundwater)(Stop N)(Flux_Zone_Average ?a)
(Flux_Zone_Average_Last ?b)(HydraulicConductivity ?c)
(HydraulicConductivity_Last ?d)(Counter ?e)(Restart_K ?f)
(Head_Sim_Average ?g)(Head_Sim_Average_Last ?h)(Counter_K ?i))
=>
(if (eq ?f nil) then (bind ?f 0) )
(if (eq ?i nil) then (bind ?i 0) )
(if (neq ?e 1)
then
(if (and (and (> ?b 0) (> ?c ?d)) (< ?g ?h) (< ?f ?e))
then (send ?obj put-RStop_K Y)
(send ?obj put-Rstart_K (+ ?e 2)))
(if (and (and (> ?b 0) (< ?c ?d)) (> ?g ?h) (< ?f ?e))
then (send ?obj put-RStop_K Y)
(send ?obj put-Rstart_K (+ ?e 2)))
(if (and (and (< ?b 0) (> ?c ?d)) (> ?g ?h) (< ?f ?e))
then (send ?obj put-RStop_K Y)
(send ?obj put-Rstart_K (+ ?e 2)))
(if (and (and (< ?b 0) (< ?c ?d)) (< ?g ?h) (< ?f ?e))
then (send ?obj put-RStop_K Y)
(send ?obj put-Rstart_K (+ ?e 2)))
)
)
```

```

(defrule K3
?obj<-(object(is-a groundwater)(Stop N)(RStop_K Y)(Counter ?a)
(Restart_K ?b))
=>
(if (eq ?a ?b)
then (send ?obj put-RStop_K N))
)

```

```

(defrule S2
?obj<-(object(is-a groundwater)(Stop N)(Head_Sim_StdDev ?a)
(Head_Sim_StdDev_Last ?b)(SpecificYield ?c)(SpecificYield_Last ?d)
(Counter ?e)(Restart_S ?f)(Counter_S ?g))
=>
(if (eq ?f nil) then (bind ?f 0) )
(if (eq ?g nil) then (bind ?g 0) )
(if (neq ?e 1)
then
(if (and (and (>= ?a ?b) (>= ?c ?d) ( or (> ?b 0.0001) (> ?d 0.0001)) )
(< ?f ?e) )
then (send ?obj put-RStop_S Y)
      (send ?obj put-Restart_S (+ ?e 2)))
)
)
)

```

```

(defrule S3
?obj<-(object(is-a groundwater)(Stop N)(Head_Sim_StdDev ?a)
(Head_Sim_StdDev_Last ?b)(SpecificYield ?c)(SpecificYield_Last ?d)
(Counter ?e)(Restart_S ?f)(Counter_S ?g))
=>

```

```

(if (eq ?f nil) then (bind ?f 0) )
(if (eq ?g nil) then (bind ?g 0) )
(if (neq ?e 1)
then
(if (and (and (<= ?a ?b) (<= ?c ?d)) (< ?f ?e) )
then (send ?obj put-RStop_S Y)
      (send ?obj put-Rstart_S (+ ?e 2)))
)
)

```

```

(defrule S4
?obj<-(object(is-a groundwater)(Stop N)(RStop_S Y)(Counter ?a)
(Restart_S ?b))
=>
(if (eq ?a ?b)
then (send ?obj put-RStop_S N))
)

```

## 6. 參數大幅調整規則

```

(defrule Jump
(declare (salience 99))
?obj<-(object(is-a groundwater)(Stop N)(Jump_Switch on)(CounterR ?a)
(HydraulicConductivity ?b)(HydraulicConductivity_Last ?c))
=>
(if (eq ?a nil)
then (bind ?a 0))
(if (< ?a 11)
then

```

```

(if (eq ?a 10)
  then (send ?obj put-HydraulicConductivity (* ?b 2))
        (send ?obj put-Jump_Switch off)
        (send ?obj put-CheckLimitation_Switch off)
        (send ?obj put-Jump_again_Switch off)
        (send ?obj put-CounterR (+ ?a 1))
        (send ?obj put-K_Switch off)
        (send ?obj put-S_Switch off)
  else (send ?obj put-CounterR (+ ?a 1))
        (send ?obj put-Jump_Switch off)
        (send ?obj put-Jump_again_Switch off)
  )
)
)
)

```

```

(defrule Jump_again
(declare (salience 99))
?obj<-(object(is-a groundwater)(Stop N)(CounterR ?a)
(Jump_again_Switch on)(HydraulicConductivity ?b)
(HydraulicConductivity_Last ?c))
=>

```

```

(if (eq ?a 11)
  then
    (send ?obj put-HydraulicConductivity (* ?c 0.5))
    (send ?obj put-K_Switch off)
    (send ?obj put-S_Switch off)
    (send ?obj put-CheckLimitation_Switch off)
    (send ?obj put-CounterR (+ ?a 1))
    (send ?obj put-CompareRMSE_Switch off)
  )
)

```

)  
)

```
(defrule CompareRMSE
(declare (salience 99))
?obj<-(object(is-a groundwater)(CompareRMSE_Switch
on)(Head_RMSE ?a)(Head_RMSE_Last ?b)(HydraulicConductivity ?c)
(HydraulicConductivity_Last ?d)(CounterR ?e)(HydraulicConductivity_
Better ?f)(Head_RMSE_Better ?g)(Stop N))
=>
(if (eq ?e 12)
then (send ?obj put-CompareRMSE_Switch off)
      (send ?obj put-CounterR 0)
      (send ?obj put-K_Switch off)
      (send ?obj put-S_Switch off)
      (send ?obj put-Jump_Switch off)
      (send ?obj put-Jump_again_Switch off)
      (send ?obj put-CheckLimitation_Switch off)
      (send ?obj put-K_Tuning_Switch on)
      (if (< ?b ?a)
then (send ?obj put-HydraulicConductivity ?d)
      )
)
)
)
```